



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGATURAN POSISI MATA PAHAT *MILLING MACHINE*
MEMOTONG BENDA KERJA MENGIKUTI KONTUR
LINGKARAN**

Wahyu Arifianto
NRP 0711134000079

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Mochammad Rameli
Eka Iskandar, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**PENGATURAN POSISI MATA PAHAT *MILLING MACHINE*
MEMOTONG BENDA KERJA MENGIKUTI KONTUR
LINGKARAN**

Wahyu Arifianto
NRP 0711134000079

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Mochammad Rameli
Eka Iskandar, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 091599

**POSITION CONTROL OF CUTTING TOOL MILLING
MACHINE TO CUT WORKPIECE FOR FOLLOWING
CONTOUR OF CIRCLE**

Wahyu Arifianto
NRP 0711134000079

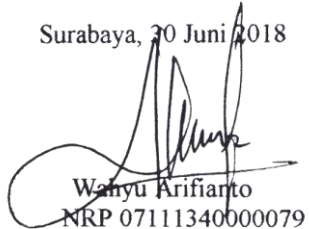
Supervisor
Dr. Ir. Mochammad Rameli
Eka Iskandar, ST., MT.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Pengaturan Posisi Mata Pahat *Milling Machine* Memotong Benda Kerja Mengikuti Kontur Lingkaran**” adalah merupakan hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 30 Juni 2018



Wahyu Arifianto
NRP 07111340000079

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

**PENGATURAN POSISI MATA PAHAT MILLING MACHINE
MEMOTONG BENDA KERJA MENGIKUTI KONTUR
LINGKARAN**

TUGAS AKHIR


Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II


Dr. Ir. Mochammad Rameli
NIP. 19541227 1981031002


Eka Iskandar, ST., MT.
NIP. 19800528 2008121001



[Halaman ini sengaja dikosongkan]

PENGATURAN POSISI MATA PAHAT *MILLING MACHINE* MEMOTONG BENDA KERJA MENGIKUTI KONTUR LINGKARAN

Wahyu Arifianto – 07111340000079

Pembimbing : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli
2. Eka Iskandar, ST., MT.

ABSTRAK

Industri manufaktur skala kecil menengah kebanyakan masih menggunakan mesin konvensional dalam proses pemotongan, pengikisan, dan pemakanan benda kerja. Penggunaan mesin milling konvensional didalam industri manufaktur masih digunakan hingga saat ini, namun memiliki kelemahan yaitu kualitas bergantung pada kreativitas dan keterampilan operator. Selain itu, sulitnya pemotongan benda kerja jika diharuskan untuk menggerakkan 2 sumbu secara bersamaan. Kelemahan ini dapat diatasi dengan menggunakan otomatisasi pada *Milling Machine* (CNC *Milling Machine*) memotong benda kerja mengikuti kontur tertentu. *Open loop control system* merupakan sistem kontrol yang dipakai didalam perancangan CNC *Milling Machine*. Untuk mengontrol keseluruhan kerja sistem digunakan PC dengan *software* Mach3 sebagai *PC Based Direct Digital Controller*. Dari hasil penelitian, CNC *Milling Machine* hasil perancangan mampu memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran. Hasil pengujian pada beban minimal pada $F=50$ mm/min didapatkan MPE sebesar 0,0661%, $F=100$ mm/min menghasilkan MPE=0,235% dan $F=150$ mm/min menghasilkan MPE=0,2677%. Pengujian beban nominal *softboard* pada $F=50$ mm/min menghasilkan MPE=0,6718%, $F=100$ mm/min menghasilkan MPE=0,82%, $F=150$ mm/min menghasilkan 0,82%. Pengujian pemotongan akrilik dengan $F=50$ mm/min menghasilkan 1,17%, $F=100$ mm/min menghasilkan PME=1,703% dan PME=3,75% pada $F=150$ mm/min.

Kata kunci : *CNC Milling Machine*, Mach3, sistem pengaturan loop terbuka

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

POSITION SETTING OF CUTTING TOOL ON MILLING MACHINE TO CUT WORKPIECE FOR FOLLOWING CONTOUR OF CIRCLE

Wahyu Arifianto – 07111340000079

Supervisor : 1. Dr. Ir. Mochammad Rameli
2. Eka Iskandar, ST., MT.

ABSTRACT

Small and medium manufacturing industry mostly still use conventional machinery in the process of cutting, erosion, and feeding of workpiece. The conventional milling machine has been being used by manufacturing industry. But it has disadvantage, which is quality is depend on operator creativity and skill. This disadvantage can be overcome by using automation on Milling Machine (CNC Milling Machine) to cut workpiece following a certain contour. So the researcher is interested to make the design of setting of the position of cutting tool of Milling Machine to cut workpiece following contour of circle. Open loop control system is a control system used in the design of DIY CNC Milling Machine. To control the entire work system used PC with Mach3 software as PC Based Direct Digital Controller. From the results of the research, CNC Milling Machine that has made are able to cut the workpiece following the contour of the circle. Test results at minimal load at $F = 50 \text{ mm / min}$ obtained MPE of 0.0661%, $F = 100 \text{ mm / min}$ yielded MPE = 0.235% and $F = 150 \text{ mm / min}$ yielded MPE = 0.2677%. The softboard nominal load test at $F = 50 \text{ mm / min}$ yields MPE = 0.6718%, $F = 100 \text{ mm / min}$ yields MPE = 0.82%, $F = 150 \text{ mm / min}$ yields 0.82%. Testing of acrylic cutting with $F = 50 \text{ mm / min}$ yielded 1.17%, $F = 100 \text{ mm / min}$ yielded PME = 1.703% and PME = 3.75% at $F = 150 \text{ mm / min}$.

Keywords : CNC Milling Machine, Mach3, Open loop control system

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Pengaturan Posisi Mata Pahat Pada Milling Machine Memotong Benda Kerja Mengikuti Kontur Lingkaran”** Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih atas segala bantuan dan dukungannya yang telah diberikan selama proses pembuatan tugas akhir ini kepada :

1. Orang tua tercinta serta keluarga dan kerabat yang senantiasa memberikan doa serta dukungan.
2. Bapak Mochamad Rameli selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan pengarahan, saran dan motivasi dalam kelancaran tugas akhir ini.
3. Bapak Eka Iskandar selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan ilmu dan bimbingan selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen, staf dan karyawan di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Gaza, Dwiki, Irfan, Feris, Handy dan seluruh teman-teman ngompek yang selalu memberikan dukungan dan motivasi selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.
6. Niela Rizki Amalia yang selalu memberikan dukungan dan motivasi selama penulis mengerjakan tugas akhir ini.
7. Rekan-rekan asisten laboratorium Teknik Sistem Pengaturan.
8. Semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam tugas akhir ini. Kritik dan saran untuk perbaikan tugas akhir ini sangat diperlukan. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak.

Surabaya, Juni 2018

Wahyu Arifianto
NRP 07111340000079

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vii
ABSTRAK.....	ix
<i>ABSTRACT</i>	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI.....	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL.....	xxi
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Metodologi.....	3
1.6 Sistematika.....	4
1.7 Relevansi.....	5
BAB 2 DASAR TEORI	7
2.1 <i>CNC Milling Machine</i>	7
2.1.1 Tata Nama Sumbu dan Sistem Koordinat pada <i>CNC Milling Machine</i>	8
2.1.2 Prinsip Kerja <i>CNC Milling Machine</i>	9
2.1.3 Operasi <i>CNC Milling Machine</i>	9
2.1.4 Jenis Mata Pahat <i>CNC Milling Machine</i>	10
2.2 Mach3 (Computer Basec CNC Control Software)	16
2.2.1 Hardware Requirement	17
2.2.1.2 Emergency Stop Botton (Estop).....	18
2.2.1.3 Motor Stepper	19
2.2.1.4 <i>Stepper driver</i>	19
2.3 <i>Task Flow Operation of CNC Milling Machine</i>	22
2.3.1 Tahapan pembuatan <i>Part Programing</i>	23
2.3.2 <i>Manual Part Programming</i>	25
2.3.3 <i>Automatic Part Programming</i>	25
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM	37
3.1 Desain <i>Plant</i> DIY <i>CNC Milling Machine</i>	38

3.2	<i>Hardware Requirement</i>	39
3.3	<i>Connecting To Machine</i>	44
3.4	Konstruksi <i>Elektrical</i> dan <i>Mechanical Component</i>	45
3.5	Konfigurasi Kontroler.....	46
3.5.1	Menentukan alamat <i>port</i> yang digunakan.	47
3.5.2	Menentukan Input dan Output sinyal yang digunakan	47
3.5.3	<i>Tuning Motor</i>	48
BAB 4 PENGUJIAN DAN ANALISA		51
4.1	<i>Unit Testing</i>	51
4.1.1	<i>Pararel Port</i>	51
4.2	Pengujian Beban Minimal	54
4.2.1	Pengujian Beban Minimal Dengan Feedrate 50 mm/min	54
4.2.2	Pengujian Beban Minimal Dengan Feedrate 100 mm/min ..	56
4.2.3	Pengujian Beban Minimal Dengan <i>Feedrate</i> 150 mm/min ..	58
4.3	Pengujian Beban Nominal	59
4.3.1	Pengujian beban nominal memotong <i>softboard</i>	59
4.3.2	Pengujian beban nominal memotong akrilik	62
4.3.3	Pengujian Pemotongan benda kerja mengikuti kombinasi kontur circular dan linier.....	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		67
5.1	Kesimpulan.....	67
5.2	Saran	67
DAFTAR PUSTAKA		69
LAMPIRAN		71
RIWAYAT HIDUP		105

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 a. Horizontal Milling Machine b. Vertical Milling Machine	7
Gambar 2. 2 Sumbu Koordinat dan Arah Sumbu Koordinat	9
Gambar 2.3 Mata Pahat Rata (Plain Milling Cutter).....	11
Gambar 2.4. Pisau Samping Dua Sisi	11
Gambar 2.5. Pisau Samping Berselang dan Satu Sisi	12
Gambar 2.6. Bentuk dan Penggunaan <i>Face Milling Cutter</i>	12
Gambar 2.7. Bentuk dan Aplikasi <i>Concave Milling Cutter</i>	13
Gambar 2.8. Bentuk dan Aplikasi <i>T Slotting Milling Cutter</i>	13
Gambar 2.9. Bentuk dan Aplikasi <i>Slitting Saw Milling Cutter</i>	13
Gambar 2.10. Operasi <i>Side Milling, Face Milling, Slot Milling</i> Menggunakan <i>End Mill Cutter</i>	14
Gambar 2.11. a. Pisau Ujung Kasar b. Pisau Ujung Halus	15
Gambar 2.12. a. Pisau Ujung Persegi dan b. Pisau Ujung Bulat	15
Gambar 2.13. Pisau Ujung Cangkang	16
Gambar 2.14. <i>Main Part CNC Operation</i>	16
Gambar 2.15. <i>Pararel Port</i> Dengan Arah Aliran Data	17
Gambar 2.16. <i>Breakout Board 3 Axis</i>	17
Gambar 2.17. <i>Emergency Stop Botton</i>	18
Gambar 2.18. Motor Stepper Sanyo Denki Nema 23.....	18
Gambar 2.19. <i>Full Step Operation</i> : a. <i>One Phase On</i> , b. <i>Two Phase On</i>	19
Gambar 2.20. <i>Task Flow Operation of CNC Milling Machine</i>	22
Gambar 2.21. Alur Metode Pembuatan <i>Part Program</i>	23
Gambar 2.22. Ilustrasi <i>Cutting Speed</i>	25
Gambar 2.23. Ilustrasi <i>Feedrate</i> (Panjang Sayatan Per Menit (F))	26
Gambar 2.24. Struktur Blok CNC	28
Gambar 2.25. Arah Gerak Perintah G00	30
Gambar 2.26. Arah Gerakan G02 dan G03	30
Gambar 2.27. Penentuan Titik Pusat Pada Interpolasi Circular	30
Gambar 2.28. Pergeseran Titik Nol Mesin (M) Ke Titik Nol Benda Kerja	31
Gambar 2.29. <i>Absolute Dimensioning</i>	32
Gambar 2.30. <i>Incremental Dimensioning</i>	32
Gambar 3.1. Tahapan Penelitian	35
Gambar 3.2 Blok Diagram <i>CNC Milling Machine</i> yang Dirancang	36
Gambar 3.3. Desain <i>DIY CNC Milling Machine</i>	37
Gambar 3.4. <i>Leadscrew</i> Dengan <i>Brass Nut</i>	39

Gambar 3.5. <i>Stepper Motor Driver</i>	40
Gambar 3.6. Skema Rangkaian <i>Stepper Motor Driver</i> TB6600HG	40
Gambar 3.7. <i>DC Air Cooled Brush Motor Spindle</i>	42
Gambar 3.8. <i>DC Motor Driver Using PWM Controller</i>	43
Gambar 3.9. Wiring Diagram Input dan Output Sistem	43
Gambar 3.10. Hasil Konstruksi Mekanik dan Elektrik <i>CNC Milling Machine</i> Yang Dirancang	44
Gambar 3.11. Konfigurasi <i>Pararel Port</i>	45
Gambar 3.12. <i>Motor Output Set Up</i>	46
Gambar 3.13. Tuning Motor Stepper Pada Sumbu X	47
Gambar 3.14. <i>Characteristic Diagram Stepper motor</i> SANYO Denki Tipe 103H6707-0741 Nema 23	48
Gambar 4.1. Pin Output Pada <i>Pararel Port</i>	49
Gambar 4.2 . (a) Tegangan output <i>pararel port (Low)</i> (b) Tegangan output <i>pararel port (High)</i>	50
Gambar 4.3. Pembentukan Kontur Lingkaran Pada Beban Minimal Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min <i>Acceleration</i> 5 mm/s ² dan Diameter Lingkaran 40 mm.....	53
Gambar 4.4. Kesalahan Kontur Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 mm Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min Dan <i>Acceleration</i> 5mm/s ²	53
Gambar 4.5. Hasil Kontur Pengujian Beban Minimal Mengikuti Kontur Lingkaran Dengan F=100 mm/min; A = 5 mm/s ² ; D = 40 mm	54
Gambar 4.6. Kesalahan Kontur Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 mm Dengan <i>Feedrate</i> 100 mm/min dan Percepatan 5 mm/s ²	54
Gambar 4.7. Hasil Kontur Pengujian Beban Minimal Mengikuti Kontur Lingkaran Dengan F=150 mm/min; A = 5 mm/s ² ; D = 40 mm	56
Gambar 4.8. Kesalahan Kontur Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 mm Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min dan Percepatan 5 mm/s ²	56
Gambar 4.9. Hasil Pemotongan Benda Kerja <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek	57
Gambar 4.10. Hasil Pemotongan Benda Kerja <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 100 mm/min a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek ..	58
Gambar 4.11. Hasil Pemotongan Benda Kerja <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 150 mm/min a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek	59

Gambar 4.12. Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan Feedrate 50 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang.....	60
Gambar 4.13. Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan Feedrate 100 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang.....	61
Gambar 4.14. Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan Feedrate 150 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang.....	62
Gambar 4.15. Desain Produk Pemotongan Benda Kerja Kombinasi Interpolasi Circular dan Linier	63
Gambar 4.16. Hasil Produk Pemotongan Benda Kerja Kombinasi Interpolasi Circular dan Linier	63

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Struktur Program.....	27
Tabel 2.2. Struktur Kata	27
Tabel 2.3. Urutan Kata	28
Tabel 2.4. Contoh Program Dengan Menggunakan Komentar	29
Tabel 3.1. <i>Role of Pin Breakout Board</i>	38
Tabel 3.2. Spesifikasi Motor Stepper.....	41
Tabel 3.3. Spesifikasi Motor Spindle	42
Tabel 4.1. Tegangan Keluaran Tiap Pin Output.....	50
Tabel 4.2. Nilai Tegangan Output Pada Breakout Board	51
Tabel 4.3. Tegangan Output Terhadap Variasi <i>Duty Cycle</i>	51
Tabel 4.4. Pengujian Beban Minimal Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm	53
Tabel 4.5. Pengujian Beban Minimal Dengan <i>Feedrate</i> 100 mm/min <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm	55
Tabel 4.6. Pengujian Beban Minimal Dengan <i>Feedrate</i> 150 mm/min <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm	57
Tabel 4.7. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 50 mm/min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm.	58
Tabel 4.8. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 100 Mm/Min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm	59
Tabel 4.9. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada <i>Softboard</i> Dengan <i>Feedrate</i> 150 Mm/Min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm	59
Tabel 4.10. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan <i>Feedrate</i> 100 Mm/Min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm	60
Tabel 4.11. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan <i>Feedrate</i> 100 Mm/Min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm	61
Tabel 4.12. Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan <i>Feedrate</i> 150 Mm/Min, <i>Percepatan</i> 5 mm/s ² dan <i>Depth of Cut</i> 0.5 mm	62

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 1

PENDAHULUAN

Bab ini mengantarkan pembaca untuk dapat menjawab pertanyaan mengapa, apa yang diteliti, untuk apa suatu penelitian dilakukan. Jawaban pertanyaan tersebut akan diuraikan pada bab ini yang meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika dan relevansi.

1.1 Latar Belakang

Di dalam dunia industri manufaktur, proses pemotongan, baik pemotongan berbahan baku logam, kayu dan bahan baku lainnya, merupakan salah satu dari proses *manufacturing* yang sangat penting. Melalui proses tersebut, suatu bahan baku akan diubah menjadi barang jadi sesuai dengan desain yang diinginkan.

Pada industri kecil dan menengah, dalam proses pemotongan, pengikisan, dan pembentukan suatu benda kerja kebanyakan masih menggunakan mesin milling konvensional. Dalam pengoperasian mesin milling konvensional, posisi mata pahat memotong benda kerja diatur menggunakan suatu *handwheel* yang diputar secara manual untuk menggerakkan tiap sumbu mesin. Hal ini cukup menyulitkan ketika operator diharuskan untuk menghasilkan pergerakan 2-3 sumbu mesin secara bersamaan untuk memotong benda kerja mengikuti kontur tertentu. Selain itu, kualitas produksi yang dihasilkan pada penggunaan mesin milling konvensional sangat bergantung pada pengetahuan, keterampilan dan jam terbang operator mesin [1]

CNC *Milling Machine* merupakan salah satu peralatan yang sering digunakan untuk proses pemotongan, baik pemotongan logam (*Metal Cutting*), kayu, akrilik dan lain lain. Dimana CNC *Milling Machine* mampu untuk memotong, mengikis, dan membentuk bahan baku menjadi produk yang diinginkan. Pada CNC *Milling Machine* terdapat dua komponen utama, yaitu komponen mekanik dan komponen elektronik. Dimana komponen mekanik berfungsi untuk melakukan operasi-operasi pembentukan benda kerja, sedangkan komponen elektronik berfungsi sebagai kontroler yang akan mengatur dan memberikan perintah pada komponen mekanik agar dapat membentuk benda kerja sesuai dengan yang diinginkan.

G&M *Code* merupakan kode instruksi yang digunakan untuk mengatur pergerakan mata pahat dengan memberikan perintah pada mesin agar bergerak memotong benda kerja sesuai dengan yang diinginkan. Melalui prosedur pembuatan G&M *Code* yang benar, dengan mempertimbangkan beberapa faktor yang mempengaruhi permesinan, akan menghasilkan produk dengan *contour error* yang minimal.

DIY CNC *Milling (Do It Your CNC Milling)* merupakan istilah dimana CNC *Milling* tersebut dirakit dan dibuat sendiri oleh pemilik atau pengguna CNC tersebut. Sehingga, dengan menggunakan DIY CNC *Milling* memungkinkan merancang spesifikasi sistem disesuaikan dengan kebutuhan dan ketersediaan finansial pengguna CNC. Dengan demikian CNC bukan menjadi barang yang eksklusif yang hanya dimiliki oleh industri berskala besar, akan tetapi industri skala menengah dan kecil pun mampu untuk menggunakan salah satu mesin yang penting didalam industri manufaktur.

Open loop control system merupakan konstruksi sistem pengaturan yang sering dijumpai pada CNC untuk mengatur pergerakan mata pahat memotong benda kerja mengikuti kontur yang diinginkan. Hal ini dikarenakan konstruksi pada *open loop control system* tidak terlalu rumit, selain itu didalam perancangannya tidak memerlukan biaya yang cukup besar jika dibandingkan dengan konstruksi sistem pengaturan yang lainnya. [8]

1.2 Perumusan Masalah

Dalam pengoperasian mesin milling konvensional, frais, posisi mata pahat memotong benda kerja diatur menggunakan suatu *handwheel* yang diputar secara manual untuk menggerakkan tiap sumbu mesin.[1] Hal ini cukup menyulitkan ketika operator diharuskan untuk menghasilkan pergerakan 2-3 sumbu mesin secara bersamaan untuk memotong benda kerja mengikuti kontur tertentu. Gerakan melingkar adalah salah satu contoh pergerakan pada mesin yang mengharuskan untuk menggerakkan 2 sumbu secara bersamaan. Selain itu, kualitas produksi yang dihasilkan pada penggunaan mesin frais sangat bergantung pada pengetahuan, keterampilan dan jam terbang operator mesin.

Dari pemaparan diatas, untuk mengatasi permasalahan tersebut, maka perlu untuk merancang otomatisasi pergerakan mata pahat pada *Milling Machine* memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran. Sistem pengaturan yang digunakan merupakan sistem pengaturan loop

terbuka yang pada perancangannya tidak memerlukan biaya yang cukup besar.

1.3 Batasan Masalah

Pada penelitian Tugas Akhir kali ini, pengaturan posisi mata pahat pada *Milling Machine* memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran, dilakukan pembatasan-pembatasan masalah untuk menghindari lingkup masalah yang terlalu meluas. Dimana batasan masalah tersebut antara lain adalah obyek penelitian merupakan DIY CNC *Milling Machine* yang dirancang sendiri dengan bahan dasar bodi mesin menggunakan kayu, *output* sistem yang dikendalikan merupakan posisi pada masing-masing sumbu, sistem yang dirancang merupakan sistem loop terbuka dengan bantuan *software* Mach3 sebagai *PC Based Direct Digital Controller*, pengujian dilakukan pada beban minimal dan nominal dimana pengujian beban nominal menggunakan benda kerja *softboard* dan akrilik, pengujian dilakukan memotong benda kerja pada *feedrate* 50, 100 dan 150 mm/min, dan pengukuran pada pengujian beban nominal dilakukan dengan menggunakan jangka sorong.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah Membuat perancangan pengaturan posisi mata pahat pada *Milling Machine* memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran dengan bantuan *software* Mach3 sebagai *direct digital controller* dengan sistem pengaturan loop terbuka (*Open Loop Control System*).

1.5 Metodologi

Kegiatan penelitian pada tugas akhir ini mencakup studi literatur yang dilakukan dengan membaca beberapa referensi mengenai topik yang akan diangkat sampai diperoleh gambaran yang jelas mengenai sistem yang akan dirancang. Permasalahan yang dihadapi adalah bagaimana Kesalahan Kontur yang terjadi pada DIY CNC *Milling Machine* yang telah dirancang untuk memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran.

Dari permasalahan yang telah diketahui selanjutnya dipelajari mengenai prosedur yang dapat mengatasi permasalahan tersebut dan penggunaannya pada sistem.

Tahapan kedua, Perancangan sistem DIY CNC *Milling Machine*, dimulai dari perancangan desain *Plant*, dimana *plant* dirancang

merupakan *plant CNC Milling 3 Axis tool movement*. Setelah tahapan tersebut terselesaikan, yang dilakukan adalah menentukan kebutuhan *hardware* yang disesuaikan dengan perencanaan *plant*. Tahap selanjutnya adalah pengujian tiap *unit hardware*, setelah pengujian unit *hardware*, dilakukan pengujian integrasi *hardware*. Pengujian dilakukan bertujuan untuk melihat dan mengamati respon tiap *hardware* telah sesuai dengan spesifikasi atau tidak. Setelah pengujian terselesaikan, selanjutnya dilakukan tahapan perakitan sistem.

Dari *plant* yang telah dibuat tersebut kemudian dihubungkan kedalam komputer untuk dilakukan konfigurasi kontroler. Pada penelitian kali ini menggunakan *software Mach3* sebagai *software CNC Controller* berbasis *Computer Based Control*. Tahap selanjutnya adalah melakukan kalibrasi alat agar didapatkan respon dengan kesalahan kontur yang paling minimal.

Setelah dilakukan tahap perancangan, tahap selanjutnya adalah uji coba sistem dan analisa. Pada tahapan ini dilakukan pengujian pemotongan dengan variasi diameter benda kerja, serta variasi kecepatan pemotongan untuk mengetahui kesalahan kontur hasil pemotongan dengan spesifikasi hasil yang diinginkan. Tahapan terakhir dari tugas akhir kali ini adalah penulisan laporan penelitian.

1.6 Sistematika

Penulis membagi laporan penelitian ini menjadi lima bab yang terhubung satu sama lain. Hal ini untuk menghindari kesalahan interpretasi terhadap isi yang terdapat di dalam laporan. Penjelasan tentang masing-masing bab dibuat dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

Bab I Pendahuluan

Bab ini meliputi latar belakang, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika dan relevansi.

Bab II Dasar Teori

Bab ini membahas tinjauan pustaka yang membantu penelitian, di antaranya adalah teori berkaitan dengan *Task Flow Operation CNC Milling Machine*, Open loop control pada CNC Milling Machine, konstruksi *G&M Code*, *plant CNC Milling Machine*.

Bab III Perancangan Sistem

Bab ini membahas perancangan sistem yang desain *plant CNC Milling Machine 3 Axis*, penentuan kebutuhan *hardware*, perancangan mekanik dan elektrik, *Mach3 Configuration*.

Bab IV Hasil dan Analisa

Bab ini memuat hasil penerapan perancangan yang telah dibuat dan analisisnya.

Bab V Penutup

Bab ini berisi kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah diperoleh.

1.7 Relevansi

Perancangan sistem *DIY CNC Milling Machine*, dapat dijadikan sumber referensi dalam pembuatan plant. selain itu dapat dikembangkan pada penelitian mahasiswa lain dengan topik yang serupa.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

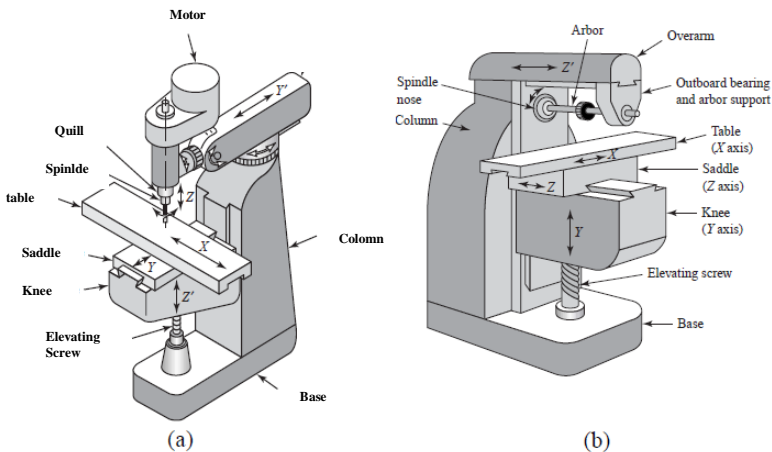
BAB 2

DASAR TEORI

Suatu teori diperlukan sebagai landasan maupun dasar untuk penulis dalam melakukan sebuah penelitian. Teori-teori tersebut dikaji terlebih dahulu untuk menunjang serta memperkuat penelitian penulis. Pada bab ini akan diuraikan teori mengenai *plant*, kontroler dan metode yang digunakan untuk mengatasi masalah pada tugas akhir ini.

2.1 *CNC Milling Machine*

CNC Milling Machine adalah mesin perkakas yang digunakan untuk memotong, mengikis dan membentuk benda kerja sesuai dengan yang diinginkan. Dalam membentuk benda kerja *CNC Milling Machine* dituntut untuk dapat bergerak sesuai dengan bentuk benda yang diinginkan.



Gambar 2. 1 a. *Horizontal Milling Machine* b. *Vertical Milling Machine*

Dimana pada umumnya *CNC Milling Machine* memiliki 3 sumbu gerak yaitu sumbu X, Y, dan Z. Sumbu X untuk pergerakan benda untuk kedepan dan kebelang, sumbu Y untuk pergerakan ke kanan dan ke kiri. Sedangkan sumbu Z untuk pergerakan keatas dan kebawah. Dimana, pada tiap sumbunya digerakkan oleh sebuah motor. Motor yang digunakan pada *CNC Milling Machine* pada umumnya adalah motor servo atau motor stepper. Pada *CNC Milling Machine* terdapat bagian yang berputar

yang sering disebut sebagai spindle. Dimana pada spindle terdapat pisau potong atau mata pahat yang digunakan untuk memotong, mengikis dan membentuk benda kerja sesuai dengan yang diinginkan. Benda kerja adalah benda yang akan dibentuk oleh mesin CNC untuk menghasilkan suatu produk *manufacturing*.

Berdasarkan posisi spindle, *CNC Milling Machine* dibedakan menjadi 2 macam yaitu:

1. *Horizontal Milling Machine*

Mesin milling horisontal (*Horizontal Milling Machine*) adalah mesin milling dimana spindle dipasang secara horisontal. Pada bagian spindle dipasang arbor yang berfungsi untuk memasang pisau pemotong. *Horizontal Milling Machine* ditunjukkan pada gambar 2.1 bagian a.

2. *Vertical Milling Machine*

Sesuai dengan namanya *vertical Milling Machine* adalah *Milling Machine* dimana poros spindlenya dikonstruksikan dalam posisi tegak.

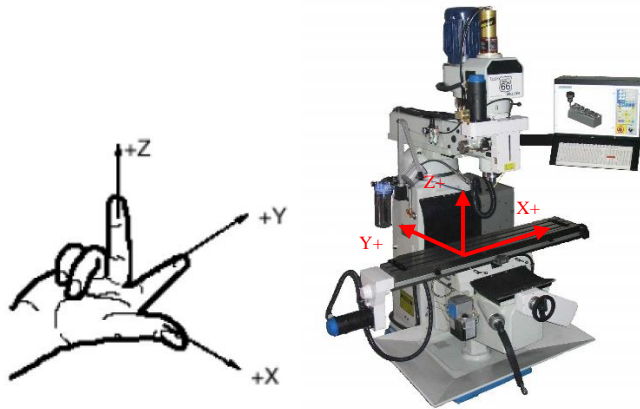
2.1.1 Tata Nama Sumbu dan Sistem Koordinat pada *CNC Milling Machine*

Pada *CNC Milling Machine*, untuk menggerakkan alat potong agar dapat bergerak sesuai dengan yang diinginkan digunakanlah sistem koordinat. Sistem koordinat tersebut berfungsi untuk mendiskripsikan gerakan pada mesin sebagai gerakan relatif antara benda kerja dan alat potong. Sistem koordinat yang digunakan pada *CNC Milling Machine* adalah sistem koordinat segi empat (*rectangular coordinate systems*) dengan aturan tangan kanan [2]. *Rectangular coordinate systems* ditunjukkan pada gambar 2.2. Arah gerakan alat potong dibuat pada program CNC dengan asumsi bahwa pada waktu proses pemotongan, alat potong yang bergerak, bukan benda kerja.

Pada *CNC Milling Machine*, sistem koordinat tersebut diterapkan untuk sistem koordinat mesin (*Machine Coordinate System*) dan sistem koordinat benda kerja (*Workpiece Coordinate System*). Pada umumnya sistem koordinat mesin diberi simbol M dan sistem Benda kerja diberi simbol W.

Titik nol (0,0,0) pada sistem koordinat mesin disebut dengan titik nol mesin yang digunakan sebagai titik referensi, sehingga semua sumbu koordinatnya titik nolnya berada disitu. Titik nol tersebut dapat dipindah

berdasarkan kepentingan pelaksanaan setting, dan pembuatan program CNC dan gerakan alat potong.



Gambar 2. 2 Sumbu Koordinat dan Arah Sumbu Koordinat

Sistem koordianat benda kerja adalah sistem koordinat ynag digunakan untuk mendiskripsikan geometri dari benda kerja. Titik nol benda kerja dapat bebas dipindahkan oleh pembuat program CNC. Pada umumnya pembuatan program mengacu pada titik nol benda kerja.

2.1.2 Prinsip Kerja CNC Milling Machine [3]

Berdasarkan cara perpindahan spindle (bagian yang berputar pada CNC Milling), prinsip kerja CNC Milling Machine dibedakan menjadi 2, yaitu *Point to Point* (PTP) dan *Contouring* (interpolasi). Berdasarkan pada prinsip kerja *Point to Point*, spindle berada pada titik koordinat tertentu, melakukan pekerjaan, dan kemudian berpindah ke posisi selanjutnya untuk melakukan pekerjaan kembali. Sedangkan pada prinsip kerja interpolasi, adalah proses dimana mata pahat terus bersentuhan dengan benda kerja ketika bergerak dari satu titik ke titik yang lain. Dimana pada proses interpolasi terbagi menjadi 2 jenis yaitu *linear* dan *circular*.

2.1.3 Operasi CNC Milling Machine

Mata pahat pada Milling Machine digunakan untuk membentuk berbagai variasi permukaan yang berbeda-beda tergantung dengan proses

operasi yang digunakan. Berikut merupakan jenis pengoperasian pada *Milling Machine*:

1. Plain Milling

Plain Milling merupakan proses dimana pembentukan benda kerja yang paralel dengan sumbu mata pahat. Pada dasarnya pemotongan yang dihasilkan berbentuk datar (*flat*).

2. Side Milling

Sumbu dari mata pahat atau pisau sejajar dengan permukaan benda kerja yang akan dibentuk. Mata pahat memotong hanya dengan menggunakan sisinya dari sisi silindris mata pahat.

3. Straddle Milling

Secara umum *straddle milling* ditunjukkan pada gambar 2.3 dimana terdapat dua mata pahat yang digunakan.

4. Form Milling

Form Milling adalah proses operasi yang bertujuan untuk menghasilkan bentuk / kontur yang cukup kompleks. Dimana bentuk tersebut dihasilkan oleh penggunaan mata pahat yang memiliki bentuk khusus.

5. Slotting and Slitting Milling Machine

Slotting Operation merupakan operasi yang digunakan untuk pembuatan slot berbentuk khusus. Misalnya penggunaan alur cutter berbentuk T. Sedangkan, *Slitting Operation* merupakan operasi yang digunakan untuk membuat suatu alut dengan lebar tertentu yang membelah benda kerja.

6. Face Milling

Pada operasi *Face Milling* akan menghasilkan suatu permukaan benda kerja yang datar dan tegak lurus dengan mata mata pahat. Operasi ini sangat efektif untuk mengurangi benda kerja dimana benda kerja yang dikikis harus dipegan dengan aman pada meja *CNC Milling Machine*.

7. End Milling

End Milling adalah proses untuk memproduksi benda kerja dengan permukaan yang datar dengan berbagai profil. Pada umumnya pisau

2.1.4 Jenis Mata Pahat CNC Milling Machine

Terdapat berbagai macam jenis mata pahat yang umum dipakai pada proses milling. Beberapa mata pahat dapat digunakan untuk berbagai operasi milling dan beberapa mata pahat hanya dapat digunakan pada satu

jenis proses operasi saja. Pada umumnya mata pahat memiliki nama sesuai dengan jenis operasi yang dikerjakannya. Berikut jenis jenis mata pahat yang sering digunakan pada *CNC Milling Machine* untuk operasi pembentukan benda kerja:

1. Mata pahat rata (*Plain Milling Cutter*)

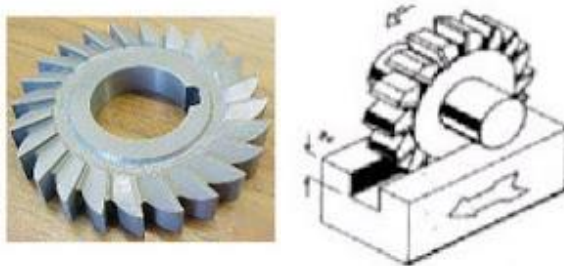
Mata pahat *Plain Milling cutter* digunakan untuk menyayat rata permukaan benda kerja yang sejajar dengan sumbu mata pahat. Mata pahat rata ada yang memiliki gigi lurus dan ada juga yang bergigi heliks.



Gambar 2.3 Mata Pahat Rata (*Plain Milling Cutter*)

2. Mata pahat samping (*Side Milling Cutter*)

mata pahat / pisau samping mirip dengan mata pahat rata, tetapi pada sisi atau kedua sisinya terdapat gigi pemotong. Mata pahat / pisau samping dibedakan menjadi pisau samping dua sisi, pisau samping gigi berselang seling dan pisau samping satu sisi.



Gambar 2.4. Pisau Samping Dua Sisi

Pisau samping dua sisi memiliki gigi yang lurus di kedua sisi dan di bagian mukanya dan dapat digunakan untuk menyayat celah atau alur yang besar pada permukaan benda kerja.



Gambar 2.5. Pisau Samping Berselang dan Satu Sisi

Pisau samping gigi berselang seling dimaksudkan untuk menghilangkan gaya dorong ke samping pada arbor. Digunakan untuk penyayatan kasar dan alur-alur atau celah.

Pisau samping satu sisi mempunyai gigi pemotong hanya pada satu sisinya dan pada bagian mukanya. Pisau ini digunakan untuk penyayatan benda kerja pada satu sisinya. Pisau samping dapat digunakan untuk penyayatan dua sisi, dapat dilaksanakan dengan dua buah pisau samping satu sisi sekaligus, dimana operasi ini disebut dengan *straddle milling*.

3. Mata pahat muka (*Face Milling Cutter*)

Mata pahat muka digunakan untuk meratakan permukaan benda kerja, dimana posisi bagian muka pisau arbornya tegak lurus terhadap bidang benda kerja yang akan disayat.

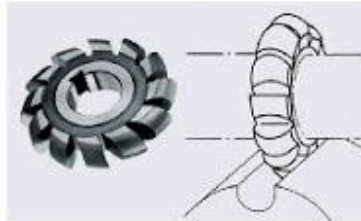


Gambar 2.6. Bentuk dan Penggunaan *Face Milling Cutter*

4. Mata pahat bentuk (*Form Milling Cutter*)

Mata pahat bentuk digunakan untuk menyayat benda kerja dengan bentuk-bentuk tertentu, seperti bentuk cekung (*concave milling cutter*), bentuk cembung (*convex milling cutter*) dan lain-lain. *Form milling cutter* mempunyai gigi-gigi pemotong pada

bagian keliling pisau yang dibentuk dengan bentuk-bentuk tertentu untuk menghasilkan bentuk khusus. Bentuk form milling cutter ditunjukkan pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Bentuk dan Aplikasi *Concave Milling Cutter*

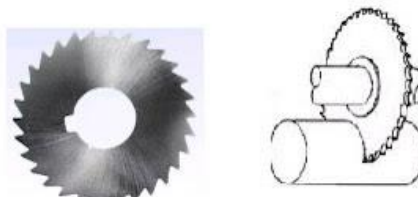
5. Mata Pahat Alur T (*T Slotting Milling Cutter*)

Mata pahat ini digunakan untuk membuat alur berbentuk T seperti alur-alur yang terdapat pada meja mesin milling, meja mesin bor, dan meja-meja sejenis lainnya. Pisau ini memiliki tangkai berbentuk tirus atau lurus yang dipasang pada arbor *vertical milling machine*



Gambar 2.8. Bentuk dan Aplikasi *T Slotting Milling Cutter*

6. Pisau Belah (*Slitting Saw Milling Cutter*)

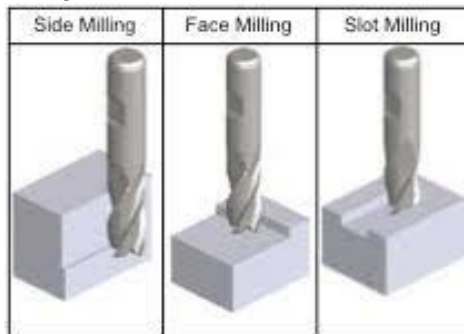


Gambar 2.9. Bentuk dan Aplikasi *Slitting Saw Milling Cutter*

7. Bentuk pisau belah menyerupai piringa yang pada kelilingnya terdapat gigi-gigi pemotong. Pisau ini dapat digunakan untuk membelah benda kerja atau untuk membuat alur.

7. Mata Pahat Ujung (*End Mill Cutter*)

Mata pahat ini memiliki gigi-gigi pemotong disekeliling badanya dan dibagian ujungnya. Mata pahat ujung (*end mill cutter*) ada yang mempunyai tangkai dan ada juga yang tidak bertangkai. Mata pahat ujung bertangkai sering disebut mata pahat jari sedangkan yang yang tidak bertangkai sering disebut pisau cangkang (*shell end mill cutter*). Dimana pada pisau cangkang pada bagian tengah terdapat lubang tembus yang memiliki alur pasak. *End Mill Cutter* dapat digunakan untuk operasi *face milling*, *side milling*, *angular milling*, *slot milling* dan *form milling*.



Gambar 2.10. Operasi *Side Milling*, *Face Milling*, *Slot Milling* Menggunakan *End Mill Cutter*.

Mata pahat ujung (*end mill cutter*) terbagi menjadi beberapa jenis antara lain:

> Pisau ujung kasar (*Roughing end mill*)

Pada ujung kasar dapat menyayat benda kerja lebih cepat, akan tetapi akan menghasilkan permukaan sayatan menjadi kasar. Pisau ujung kasar biasanya dipakai pada pekerjaan awal. Bentuk pisau ujung kasar ditunjukkan pada gambar 2.11. a



Gambar 2.11. a. Pisau Ujung Kasar b. Pisau Ujung Halus

> Pisau ujung halus (*Finishing end mill*)

Pisau jenis ini menghasilkan sayatan yang halus, dimana pisau ujung halus digunakan untuk pekerjaan penyelesaian benda kerja sebelumnya yang telah dikerjakan oleh pisau ujung kasar. Bentuk finisging end mill ditunjukkan pada gambar 2.11 b.

> Pisau ujung persegi (*Square end mill*)

Pisau mill ujung persegi digunakan untuk memotong / membentuk sudut persegi pada bagian-bagian sudut benda kerja.



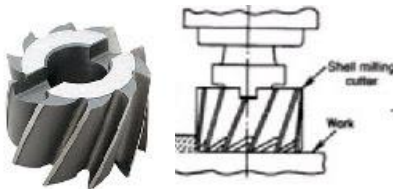
Gambar 2.12. a. Pisau Ujung Persegi dan b. Pisau Ujung Bulat.

> Pisau hidung bulat (*Ball nose mill*)

Pisau ini mempunyai bagian tepi yang dibulatkan seperti bentuk bola. Bagian bulat pada ujung (galur) dapat memperkecil tatal atau beram yang dihasilkan. Pisau jenis ini digunakan untuk pembuatan alur bulat, fillet atau kontur 3 dimensi seperti pembuatan cetakan (mould atau dies dan bentuk bulat lainnya.

> Pisau ujung cangkang (*Shell end mill*)

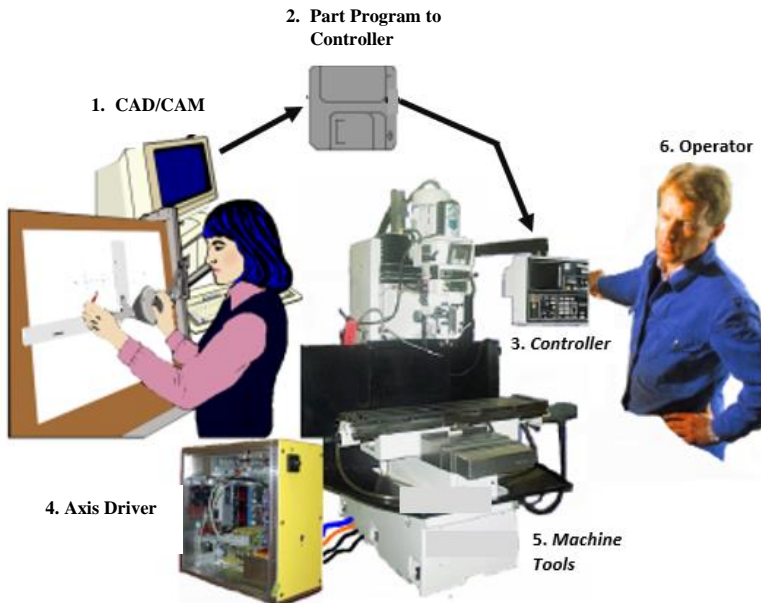
Pisau potong ujung cangkang atau shell end mill merupakan jenis pisau mill ujung yang tidak bertangkai. Pisau ini memiliki lubang dibagian tengahnya dimana terdapat alur pasa. Pisau ini dipasang pada arbor untuk shell end mill.



Gambar 2.13. Pisau Ujung Cangkang

2.2 Mach3 (Computer Basec CNC Control Software) [5]

Mach3 merupakan perangkat lunak yang berjalan pada suatu Personal Computer (PC) yang dapat digunakan sebagai Digital Direct Controller yang akan mengatur mesin sesuai dengan yang diinginkan oleh operator melalui G-Code Program. Mach3 pada PC akan menggantikan CNC Control Panel yang biasa digunakan pada beberapa mesin CNC dipasaran (no.3 pada gambar 2.14).

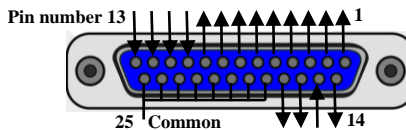


Gambar 2.14. Main Part CNC Operation.

Dalam menggunakan Mach3 diperlukan PC yang memiliki sistem operasi Windows 2000, Windows XP, atau Windows Vista 32-Bit.

2.2.1 Hardware Requirement

Mach3 menghubungkan driver motor, *limit switch*, dan *hardware* lainnya melalui *parallel port* pada PC. Dimana *parallel port* merupakan cara yang cukup sederhana didalam proses pentransferan data. *Parallel port* pada PC adalah Female “D” Connector, seperti yang terlihat pada gambar 2.15. Panah pada gambar 2.15 memberikan arah informasi relatif terhadap PC. Misalnya pin 15, pin kedua dari kanan baris bawah, merupakan masukan data kedalam PC.

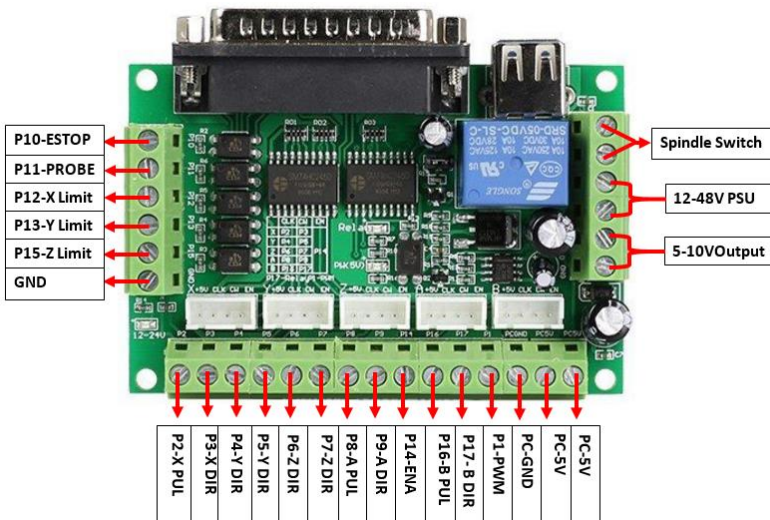


Gambar 2.15. *Parallel Port* Dengan Arah Aliran Data

Penggunaan USB to DB 25 tidak dapat digunakan untuk mengontrol mesin dengan menggunakan software Mach3, meskipun dapat menangani printer atau perangkat lain dengan mudah.

2.2.1.1 Isolating Breakout Board

Isolating Breakout Board adalah *electronic card* yang berfungsi menghubungkan sinyal data dari komputer dengan peripheral input maupun output. Penggunaan Isolating Breakout Board bertujuan untuk menghindari adanya arus yang lebih dari yang diijinkan untuk masuk kedalam *parallel port* komputer yang dapat menyebabkan komputer menjadi *crash*. *Breakout board* yang dijumpai dipasaran memiliki berbagai fitur, dimana terdapat *breakout board* yang menyediakan sinyal output PWM yang dapat digunakan untuk mengontrol PWM dan ada yang tidak dilengkapi fitur tersebut dan berbagai fitur yang lain yang dapat disesuaikan dengan perancangan sistem yang diinginkan. *Breakout board* yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.16



Gambar 2.16. *Breakout Board 3 Axis*

2.2.1.2 Emergency Stop Botton (Estop)

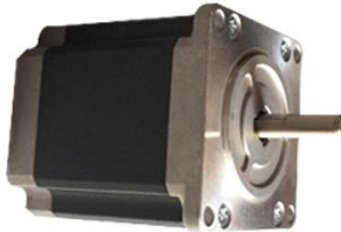
Estop merupakan peralatan yang sangat penting yang harus ada pada semua peralatan mesin. *Estop* harus dipasang pada posisi dimana operator dapat dengan mudah untuk menjangkau apabila terjadi sesuatu yang tidak diinginkan pada mesin. *Estop* harus mampu untuk menghentikan seluruh aktifitas pada mesin secepat mungkin dengan aman. Dalam hal ini, setiap sumbu mesin harus berhenti bergerak dan motor spindle berhenti berotasi. Biasanya *Estop botton* berbentuk menyerupai jamur dan memiliki warna merah. *Estop botton* ditunjukkan pada gambar 2.17.



Gambar 2.17. *Emergency Stop Botton*

2.2.1.3 Motor Stepper

Motor stepper adalah suatu motor listrik yang dapat mengubah pulsa listrik yang diberikan menjadi gerakan motor diskrit (terputus) yang disebut sebagai step (langkah). Satu putaran motor stepper (360 derajat) dengan jumlah langkah tertentu per derajatnya.



Gambar 2.18. Motor Stepper Sanyo Denki Nema 23

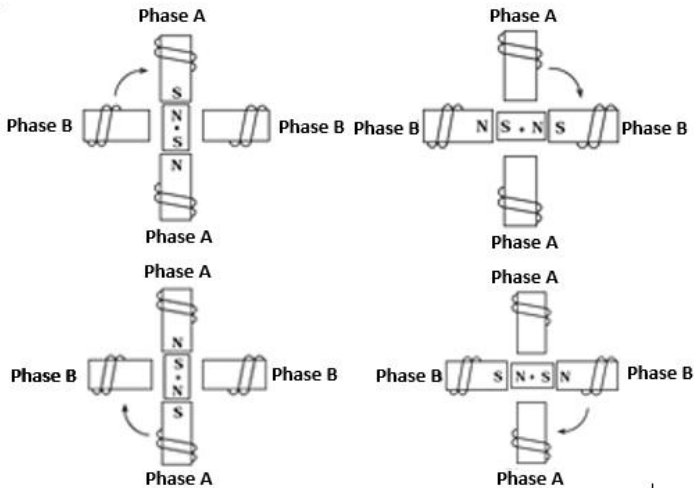
Motor stepper bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan pada motor. Karena itu stepper motor membutuhkan suatu driver yang mampu membangkitkan pulsa-pulsa periodik. Pada dasarnya motor stepper dibedakan menjadi 3 jenis antara lain motor stepper *Variable Reluctance* (VR), *Magnet Permanent*, Hybrid.

2.2.1.4 Stepper driver

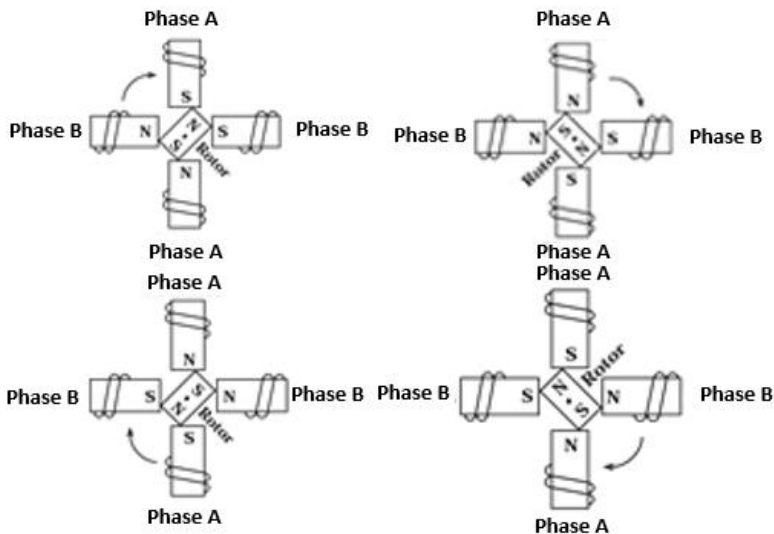
Stepper motor driver merupakan suatu rangkaian yang berfungsi untuk menggerakkan motor dengan memberikan catu daya. *Driver* mengatur pensaklaran agar motor stepper dapat berputar dengan memberikan tegangan pada kumparan stator motor. Pada dasarnya

terdapat 3 jenis mode eksitasi pada motor stepper yaitu *full step*, *half step* dan *microstepping*.

pada operasi *full step*, motor berputar sesuai dengan *step* dasar motor, misalkan motor 1,8 derajat per *step* dalam satu putaran penuh 360 derajat memerlukan langkah sebanyak 200 (200 step/revolusi). Terdapat dua mode pada operasi *full step* yaitu *single phase mode* dan *dual phase mode*. *Single phase mode* (*one-phase on, full step*) motor dioperasikan hanya dengan satu fasa yang berenergi pada satu waktu. Mode Mode ini membutuhkan daya yang paling sedikit dari mode eksitasi manapun. *Single phase mode* diilustrasikan pada gambar 2.19. Sedangkan, *dual phase mode* (*two phase on, full step*), motor dioperasikan dengan kedua fasa berenergi pada saat bersamaan.



Gambar 2.19. *Full Step Operation one phase on*



Gambar 2.20. Full Step Operation two phase on

Half step excitation adalah operasi fasa tunggal dan ganda bergantian yang menghasilkan langkah-langkah setengah sudut langkah dasar, karena sudut langkah yang lebih kecil, mode ini memberikan dua kali resolusi dan operasi yang lebih halus. *Half stepping* menghasilkan torsi kira-kira 15% lebih sedikit dari pada *dual phase full stepping*.

Microstepping adalah teknik yang meningkatkan resolusi motorik dengan mengendalikan baik arah maupun amplitudo aliran arus pada masing masing lilitan. Arus proportional dalam gulungan sesuai fungsi sinus dan cosinus. *Microstepping* bisa membagi langkah dasar hingga 256 kali. *Microstepping* meningkatkan kelancaran kecepatan yang cukup rendah dan meminimalkan efek resonansi kecepatan rendah. *Microstepping* menghasilkan torsi kira-kira 30% lebih rendah dari *dual phase full stepping*

2.3 Task Flow Operation of CNC Milling Machine [6]

Didalam pembentukan benda kerja menggunakan CNC *Milling Machine* harus melalui urutan kerja agar dihasilkan suatu produk yang memiliki hasil optimal. Selain itu, alat yang digunakan juga memiliki *lifetime* yang panjang. Urutan kerja tersebut diklasifikasikan menjadi 3 bagian yaitu:

1. Offline Task

Offline task adalah urutan kerja yang pertama yang harus dilakukan untuk menciptakan / membuat part program yang berupa G&M Code. Pada *offline task* terbagi lagi menjadi 3 rangkaian kerja. Dimana yang dilakukan pertama kali adalah menentukan model geometri produk yang ingin dihasilkan atau biasa disebut dengan *desired shape* yang dapat berupa 2D atau 3D *model*. Pada tahap ini dapat disebut dengan *Computer Aided Design* (CAM) jika menggunakan bantuan komputer dalam pembuatanya.

Setelah menentukan model geometri yang diinginkan, tahap selanjutnya adalah perencanaan proses pemotongan. Tahapan perencanaan proses pemotongan merupakan tahapan yang berhubungan dengan seperti apa dan bagaimana proses pemotongan berlangsung. Pada tahap ini dilakukan pemilihan jenis dan ukuran mata pahat, jenis operasi pemotongan, kecepatan putaran spindle, kecepatan gerak pemakanan dan kedalaman potong. Tahapan perencanaan proses pemotongan merupakan tahapan yang paling penting ditekankan untuk menghasilkan produk yang efisien. Selain itu, perencanaan proses yang baik juga akan memperpanjang umur alat yang digunakan. Tahapan ini dapat disebut dengan *Computer Aided Process Planner* (CAPP).

Tahapan terakhir yang dilakukan pada *offline task* adalah pembuatan part program (G&M Code) yang digunakan pada tahap selanjutnya dalam pemotongan benda kerja. Pembuatan G&M Code didasarkan pada bentuk produk yang ingin dihasilkan dan perencanaan proses pemotongan yang telah dibuat.

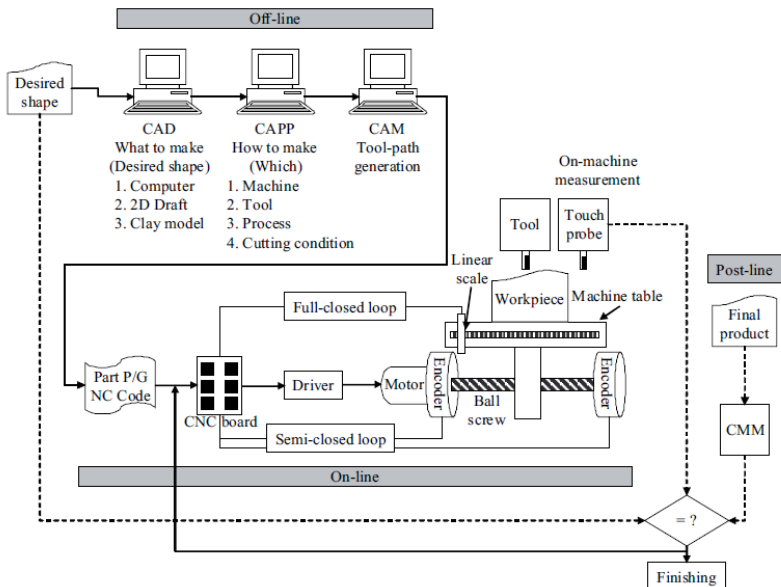
2. Online Task

Online Task adalah urutan kerja untuk membentuk benda kerja dengan menggunakan CNC *Milling Machine*. Pada tahap ini CNC *Milling Machine* membaca dan menginterpretasi *part program* dari memori dan mengontrol pergerakan tiap sumbu.

3. Postline Task

Postline Task adalah melaksanakan CAI (*Computer Aided Inspection*), melakukan pemeriksaan produk yang telah dihasilkan.

Pada tahap ini menggunakan CMM (*Coordinate Measurement Machine*), untuk membuat perbandingan antara hasil dan model geometri untuk melakukan perbaikan. Perbaikan tersebut dengan melakukan modifikasi proses perencanaan yang telah dibuat dan dengan melakukan *re-machining* atau *grinding*.



Gambar 2.21. Task Flow Operation of CNC Milling Machine

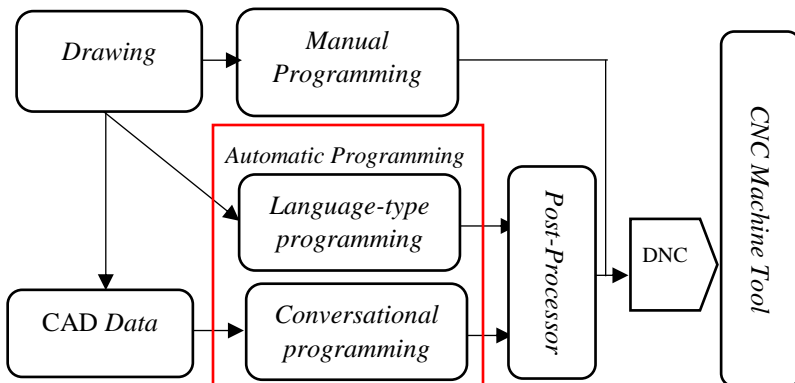
2.3.1 Tahapan pembuatan *Part Programming*

Didalam pembuatan produk dengan menggunakan *CNC Milling Machine*, perlu untuk menghasilkan serangkaian instruksi untuk mengaktifkan mesin CNC tersebut. Tahapan ini disebut dengan *CNC Programming*. Pada dasarnya, *CNC Programming* terdiri dari pembuatan sebuah proses perencanaan pemotongan dan pembuatan part program yang berupa G&M Code. Proses rinci sebagai berikut:

1. Menganalisa gambar desain.
2. Menentukan *removal volume* dan memilih mesin.
3. Menentukan jenis benda kerja yang digunakan.

4. Menentukan pengaturan, urutan permesinan, titik awal yang dipotong, kedalaman potong untuk pemakanan dan proses finishing.
5. Menentukan jenis dan ukuran alat potong / mata pahat.
6. Menentukan kecepatan putaran spindle, kecepatan pemakanan, coolant hidup atau mati.
7. Pembuatan *part program*.
8. Memverifikasi part program.
9. Proses permesinan.

Pada tahapan diatas, tahapan 1 sampai 6 merupakan tahapan persiapan dimana suatu part drawing dianalisa dan strategi permesinan ditentukan untuk membuat part program. Tugas ini disebut dengan *process planning*. *Process Planning* dibuat oleh *programmer* ataupun operator dimanana pengetahuan tentang permesinan, peralatan CNC, mata pahat , dan teori pemotongan sangat dibutuhkan untuk menghasilkan *process planning* yang baik. pada kenyataanya setiap *programmer* akan menghasilkan urutan kerja yang berbeda walaupun desain produk yang dibuat sama. Setelah *process planning*, part program (tahap 7) untuk mengontrol CNC *Milling Machine* dibuat. Untuk membuat *part program* dapat dilakukan melalui 2 metode yaitu *manual part programming method* dan *automatic programming method*.



Gambar 2.22. Alur Metode Pembuatan Part Program

Manual programming method, seorang programmer memprogram G-Code pada CNC Milling Machine secara langsung. Sedangkan pada *automatic programming method*, seorang programmer membuat desain pada sebuah Software komputer yang kemudian dikonversikan kedalam part program.

2.3.2 Manual Part Programming

Pada *manual programming*, programmer membuat program langsung membuat kode instruksi secara langsung pada laptop tanpa menggunakan bantuan *software* komputer.

Peralatan CNC menyediakan berbagai instruksi untuk fungsi persiapan, fungsi spindle, fungsi alat, fungsi pemakanan, dan fungsi lainnya yang memenuhi standar ISO. Pemrograman secara langsung dengan instruksi yang disediakan secara langsung oleh peralatan CNC disebut dengan *manual programming*.

Pada *manual programming*, kode instruksi yang dihasilkan antara satu dengan lainnya sering berbeda walaupun desired shape yang diinginkan sama. Selain itu untuk manual programming, efisiensi dan produktivitas *part program* bergantung pada kemampuan programmer. Oleh karena itu, pengetahuan tentang perencanaan proses, teori permesinan, dan G-Code diperlukan oleh setiap programmer dan diperlukan waktu latihan yang relatif lama dan usaha yang cukup giat.

2.3.3 Automatic Part Programming

Automatic Part Programming Method dapat diklasifikasikan kedalam *language-type programming method*, dan *conversational programming method*, pada *language type programming method*, *machining sequence*, *part shape*, dan *tools* didefinisikan pada bahasa yang dapat dimengerti oleh manusia yang kemudian dikonversi kedalam part program. Sedangkan *conversational programming method*, programmer memasukkan data untuk pembuatan benda kerja secara interaktif melalui GUI (Graphical User Interface), memilih urutan permesinan, dan memasukkan data-data yang lain untuk pengoperasian permesinan.

2.3.4 Basic Milling Operations

Sebelum proses permesinan dilakukan, beberapa keputusan harus dibuat. Selain memilih langkah terbaik untuk proses pemotongan dan pemilihan alat potong yang sesuai, kecepatan pemotongan dan laju pemakanan harus

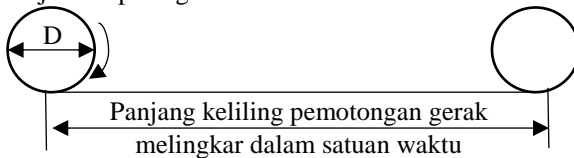
ditetapkan untuk memberikan keseimbangan yang baik antara penghilangan logam yang cepat dan umur alat yang panjang. Penentuan kecepatan pemotongan dan laju umpan yang tepat dapat dilakukan hanya jika enam faktor berikut diketahui:

- Jenis bahan yang akan dibentuk
- Kekuatan fisik pemotong
- Jenis alat potong yang digunakan
- Daya yang tersedia pada motor spindle
- Hasil akhir yang diinginkan

Beberapa faktor diatas hanya mempengaruhi kecepatan potong dan beberapa diantaranya mempengaruhi keduanya, kecepatan potong dan laju pemakanan. Tabel pada datasheet dapat memberikan perkiraan angka yang bisa digunakan sebagai acuan. Kecepatan spindle harus dihitung dan permesinan disesuaikan.

2.3.4.1 Kecepatan Potong (*Cutting Speed*)

Kecepatan Potong (*cutting speed*) didefinisikan jarak tempuh pemotongan suatu alat potong terhadap benda kerja berbanding lurus dengan waktu, baik dalam gerakan lurus ataupun gerakan melingkar. Kecepatan Potong disimbolkan dengan notasi C_s atau V_c . Ilustrasi Cutting Speed ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2.23. Ilustrasi Cutting Speed

Berikut persamaan untuk mendapatkan kecepatan potong:

$$V_c = \pi \times D \times n / 1000$$

Dimana:

V_c = *Cutting Speed* (meter/minute)

n = Kecepatan putaran (Rev/minute)

D = diameter alat potong (mm)

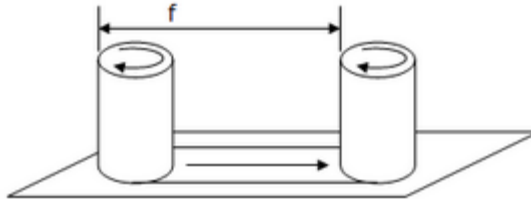
Pada umumnya kecepatan potong (V_c) ditentukan berdasarkan jenis dan ukuran mata pahat dan jenis benda kerja yang digunakan. Informasi tersebut didapatkan melalui datasheet pada mata pahat yang digunakan.

Faktor yang mempengaruhi cutting speed:

1. Kekerasan (Hardness)
Cs Lambat (Keras) → Cs Cepat (lunak)
2. Keuletan (Ductility)
Cs Lambat (Ulet) → Cs Cepat (Getas)
3. Tegangan tarik (Tensile Strength)
Cs Lambat (teg. Tarik tinggi) → Cs Cepat (teg. Tarik rendah)

2.3.4.2 Kecepatan Pemakanan (*Feed Rate*)

Feedrate didefinisikan sebagai gerak penyayatan yang ditempuh berbanding dengan waktu setiap siklus pemotongan, baik siklus gerak lurus maupun gerak melingkar. Pada umumnya feedrate disimbolkan dengan notasi F atau s , dengan satuan mm/putaran, mm/menit atau mm/langkah. Ilustrasi feedrate diilustrasikan pada gambar 2.23



Gambar 2.24 Ilustrasi Feedrate (Panjang Sayatan Per Menit (F))

Sama halnya dengan Cutting Speed, Feedrate juga penting untuk dipahami. Feedrate yang terlalu pelan hanya akan membuang waktu, alat potongan akan bergetar dan cepat tumpul karena terlalu lama bergesekan dengan benda kerja sebaliknya feedrate yang terlalu cepat akan berakibat rusak/patahnya alat potong. Oleh karena itu Feedrate disesuaikan dengan proses pengerjaannya, roughing atau finishing.

Feedrate adalah jarak penyayatan yang dihasilkan dalam satu menit yang dihitung dari besarnya sayatan pergigi (s_z) dikalikan dengan

jumlah gigi dan putaran pisau dalam satu menit. Dirumuskan sebagai berikut:

$$F=sz.z.n$$

Dimana:

F = Feedrate (mm/menit) sz = sayatan per gigi (mm/gigi)
z = Jumlah gigi n = putaran spindle (putaran/menit)

2.4 Dasar Pemograman CNC *Milling Machine* [6]

Part program (G&M *Code*) merupakan kode-kode instruksi yang digunakan untuk menerjemahkan apa yang diinginkan oleh *programmer* dengan apa yang harus dilakukan oleh CNC *Milling Machine*. Pembuatan part program didasarkan pada bentuk yang akan dibuat, kondisi permesinan dan alat potong yang digunakan. Didalam pembuatan *part program*, terdapat aturan aturan standar yang harus dipenuhi.

2.4.1 Struktur Program

Program CNC terdiri dari blok (*Block*) yang berurutan. Setiap blok merupakan langkah permesinan. Perintah atau instruksi ditulis dalam satu blok yang dibentuk dari beberapa kata (*words*). Blok terakhir dari urutan tersebut untuk mengakhiri suatu program dengan menuliskan code M3. Ilustrasi struktur program ditunjukkan pada tabel 2.21.

Tabel 2.1. Strukktur Program

	Word	Word	Word	...	;Comment
Block	N10	G0	X20	...	; First Block
Block	N20	G2	Z37	...	; Second Block
Block	N30	G91	;...
Block	N40		
Block	N50	M2			; End Block

2.4.2 Struktur Kata

Struktur kata terdiri atas alamat (*addres*) dan harga (*value*). Dimana, address berupa huruf kapital dan value berupa angka. Struktur kata (*word*) ditunjukkan pada tabel 2.2

Tabel 2.2. Struktur Kata

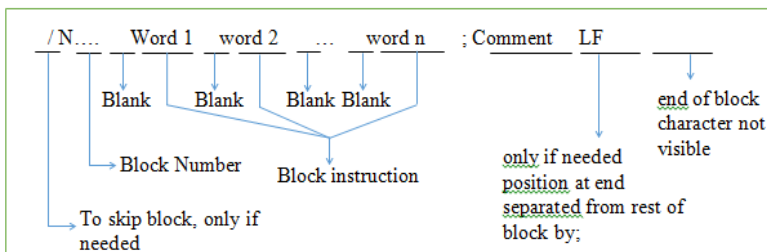
Word		Word		Word	
Address	Value	Address	Value	Address	Value
G1		X-20.1		F300	
<i>Treverse with linear interpolation</i>		<i>Path or end position for X axis -20.1 mm</i>		<i>Feed: 300 mm/min</i>	

2.4.3 jumlah karakter pada *address*

Satu kata boleh berisi beberapa huruf *address*. Akan tetapi dalam kasus ini, tanda sama dengan “=” harus disisipkan untuk menunjukkan harga dari angkanya terhadap huruf *address* yang dimaksud. Contoh: CR=5.23

2.4.4 Struktur blok

Suatu blok instruksi (*block instructions*) sebaiknya berisi semua data yang diperlukan untuk melaksanakan satu langkah pemesinan. Blok biasanya terdiri dari beberapa kata dan selalu diakhiri dengan *the end of-block character* “LF” (*Line Feed*). Dalam satu blok jumlah karakter maksimal adalah 127 buah. Diagram struktur blok/baris program digambarkan pada gambar 2.24



Gambar 2.25. Struktur Blok CNC

2.4.5 urutan kata

Ketika satu blok terdiri dari satu pernyataan, kata-kata dalam satu blok harus diatur dengan urutan pada tabel 2.3 berikut ini

Tabel 2.3. Urutan Kata

N	G	X	Y	Z	F	S	T	D	M
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

2.4.6 Blok dilewati

Blok program yang tidak dikerjakan ketika menjalankan program CNC ditandai dengan tanda garis miring “\” di depan nomer blok (*Block Skipping*). Sewaktu program dikerjakan oleh mesin, maka blok yang diawali dengan tanda “\” dilewati, sedangkan program yang dikerjakan adalah pada blool selanjutnya yang tidak menggunakan tanda miring “\”.

2.4.7 Komentar atau catatan

Catatan dapat digunakan untuk menjelaskan pernyataan dari blok program. Komentar ditampilkan bersama dengan isi program yang lain dari satu blok yang sedang tampil. Tabel 2.4 menunjukkan contoh part program dengan menggunakan komentar.

Tabel 2.4. Contoh Program Dengan Menggunakan Komentar

N10	;
N20	;
N30	;Program Created by Mr. Adams
N50 G17 G54 F470 S20 D0 M3	;Blok Utama
N60 G0 G90 X100 Y200	
N70 G1 Y185.6	
N80 X112	
\N90 X118 Y180	;Blok diabaikan
N100 X118 Y120	
N110 X135 Y70	
N130 G0 G90 X200	
N140 M2	;Program berakhir

2.5 G&M Code

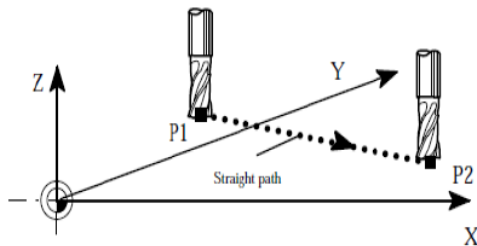
Pada pengoperasian CNC *Milling Machine*, untuk dapat menggerakkan mata pahat perlu adanya konstruksi part program yang berupa *G&M Code* yang sesuai agar dapat membuat suatu produk manufaktur. *G & M Code* merupakan kode instruksi yang terbagi menjadi 3 yaitu *Standard G-Codes*, *Non-standard G-Code*, *Miscellaneous Code*.

2.5.1 Standard G-Codes

Standard G-Code merupakan G-Code yang sesuai dengan standard yang ditetapkan *International Standard Organization* dimana dapat diterapkan pada semua jenis CNC Milling Machine yang pengoperasiannya mengacu pada ISO G-Code. *Standard G-Code* meliputi:

1. G00

G00 merupakan kode yang digunakan untuk pemindahan posisi mata pahat dari titik ketitik dengan cepat. Semua sumbu dapat bergerak bersamaan sehingga menghasilkan jalur yang lurus (ditunjukkan pada gambar 2.25). Perintah ini sangat tidak cocok untuk perpindahan alat potong dengan bersentuhan dengan benda kerja.

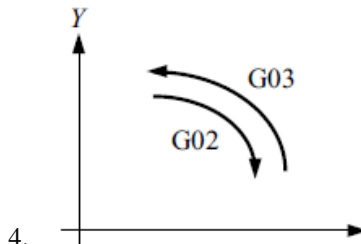


Gambar 2.26. Arah Gerak Perintah G00

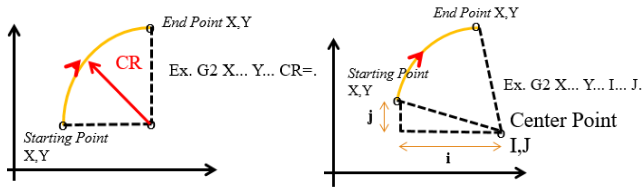
2. G01

Linear interpolation, kode ini berfungsi untuk melakukan pemakanan secara linier dengan nilai pemakanan tertentu. Kecepatan gerak makan ditentukan oleh F Code.

3. G02 / G03



Gambar 2.27. Arah Gerakan G02 dan G03



Gambar 2.28. Penentuan Titik Pusat Pada Interpolasi Circular

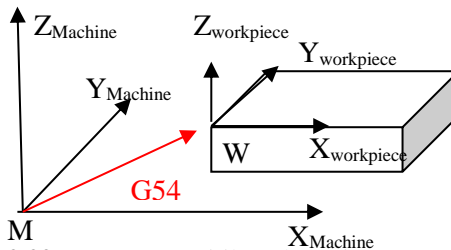
Perintah G02 atau G03 berfungsi untuk gerakan alat potong dari titik awal ke titik akhir mengikuti gerak melingkar. Arah gerakan ada dua macam dimana G02 berfungsi untuk arah gerakan searah jarum jam, sedangkan G03 untuk arah gerakan berlawanan dengan jarum jam. Format instruksi untuk penentuan titik pusat lingkaran pada G02 maupun G03 dibedakan menjadi 2 macam yaitu dengan menggunakan CR (*Circle Radius*) dan menggunakan kode instruksi I, J, K.

5. G04

Kode instruksi G04 digunakan untuk memberikan waktu tunggu (*Dwell*). waktu tunggu yang diinginkan dimasukkan pada *value* dengan *address* D.

6. G54, G55, G56 dan G57

Dengan menuliskan G54, G55, G56 dan G57 memungkinkan untuk melakukan pergeseran titik nol. Pergeseran titik nol memberitahukan secara pasti titik nol benda kerja dari titik nol mesin. Pergeseran titik nol ini dihitung saat benda kerja dicekap pada ragum dimesin dan harus diisikan pada parameter titik nol (*zero point offset*). Gambar 2.28 menunjukkan ilustrasi pergeseran titik nol mesin ke titik nol benda kerja.



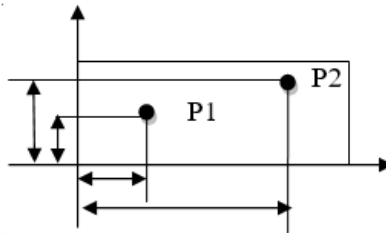
Gambar 2.29. Pergeseran Titik Nol Mesin (M) Ke Titik Nol Benda Kerja

7. G70 dan G71

Kode instruksi G70 dan G71 digunakan untuk mengatur unit pengukuran didalam pemrograman CNC. G70 mengatur inc sebagai unit pengukuran. Sedangkan G71 mengatur mm sebagai unit pengukuran.

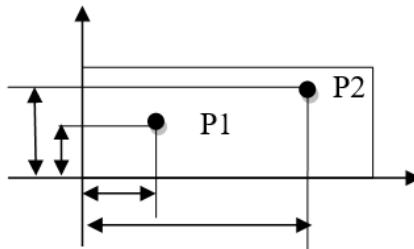
8. G90 dan G91

Kode Instruksi G90 dan G91 digunakan untuk menentukan dimensioning pada pemrograman CNC. G90 merupakan absolute dimensioning dimana memposisikan alat potong menggunakan koordinat absolut dari titik nol benda kerja. Apabila menggunakan absolute dimensioning, maka semua perintah gerakan alat potong menuju titik koordinat tertentu didasarkan pada titik nol benda kerja.



Gambar 2.30. *Absolute Dimensioning*

Kode instruksi G91 merupakan incremental dimensioning dimana pengukuran yang digunakan menggunakan koordiant relatif atau incremental. Dalam artian bahwa pergeseran alat potong diprogram dari alat potong berada ke posisi berikutnya. Titik nol berada pada sumbu alat potong terakhir berada.



Gambar 2.31. *Incremental Dimensioning*

2.5.2 Non Standard G-Code

Non Standard G-Code merupakan G-Code yang digunakan / diaplikasikan pada CNC *Milling Machine* jenis tertentu. Pada tugas akhir kali ini penulis hanya membahas non-standard G-Code yang digunakan pada CNC Mill 35-005-C yang meliputi:

1. G98

Kode instruksi G98 digunakan untuk configure engrave. Digunakan berpasangan dengan *engrave text code* (G99). Text dipusatkan pada posisi saat ini dan memiliki orientasi kemiringan 0, 90, 180 dan 270 derajat dengan menentukan value 1-4 pada address X dari pernyataan G98.

Selain itu, 1 dari 19 font dapat dipilih dengan nomer pada address Y. Jumlah karakter maksimum ditentukan di alamat / kolom Z, dengan nilai atau *value* sama dengan nol menunjukkan jumlah yang tak terbatas.

2. G99

Kode instruksi G99 merupakan pasangan dari kode instruksi G98, digunakan untuk engraving text dimana dimensi text diberikan dikolom X dan Y dari pernyataan kode G99. Bidang Z menentukan kedalaman potong. Pada umumnya diatur ke 1mm jika alat yang digunakan merupakan 2mm ball ended engraving tool.

Teks yang diukir dinyatakan dalam kolom keterangan, namun jika dibiarkan kosong, kota dialog teks akan disajikan saat program dijalankan.

2.5.3 Miscellaneous Code

Miscellaneous Code merupakan kode-kode intruksi tambahan yang digunakan untuk membantu proses permesinan didalam konstruksi *part program* pada CNC *Milling Machine*. Pada umumnya *Miscellaneous Code* disebut juga dengan M-Code, terbagi atas:

1. M00

Kode instruksi M00 merupakan kode instruksi yang digunakan untuk stop program, menunggu asus motor dimatikan dan kemudian menyala kembali. Hal ini berguna untuk perubahan alat dan saat mengatur offset pada sumbu Z. Saat kondisi berhenti, LED monitor akan berkedip cepat yang kemudian berlanjut dengan memili dari *dialog control panel*.

2. M02

Kode instruksi M02 digunakan untuk end program, diaman merupakan fungsi tersirat dipatuhi secara otomatis pada akhir pelaksanaan program. Namun, kode M02 dapat digunakan didalam program baik untuk menghentikan eksekusi lebih lanjut atau untuk menghentikan penggunaan selama pengembangan program.

3. M03

Kode instruksi M03 digunakan untuk mengatur arah putaran spindle searah dengan jarum jam. Kecepatan putaran spindle harus dispesifikan pada block yang sama, jika tidak, maka kecepatan spindle dapat ditentukan sebelumnya dengan cara diatur manual atau melalui tombol *Jog Feedrate* dikotak dialog *Control Panel CNC Mill* yang digunakan. Kecepatan yang sesuai berada pada kisaran nol sampai 4500 rpm yang dipilih dengan nomor dikisaran 0-9

4. M04

Kode instruksi ini digunakan untuk mengatur arah putaran spindle berlawanan dengan arah jarum jam.

5. M05

Kode instruksi ini digunakan untuk mematikan putaran spindle.

6. M08

Kode instruksi M08 digunakan untuk mengaktifkan semprotan udara untuk menghilangkan bekas pemotongan.

7. M09

Kode instruksi M09 digunakan untuk mematikan semprotan udara.

8. M68

Kode instruksi M68 didalam digunakan untuk menjepit benda kerja.

9. M69

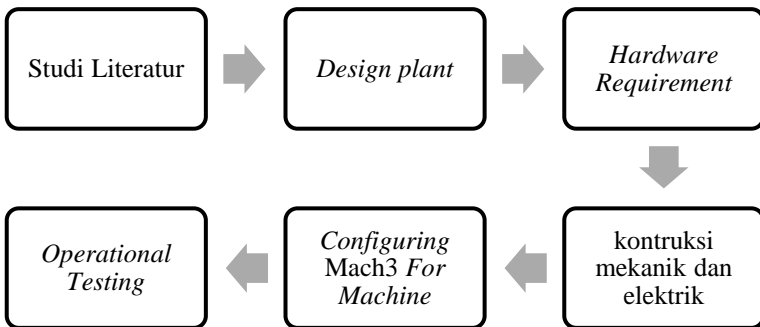
Kode instruksi M69 digunakan untuk melepaskan penjepit benda kerja.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 3

PERANCANGAN SISTEM

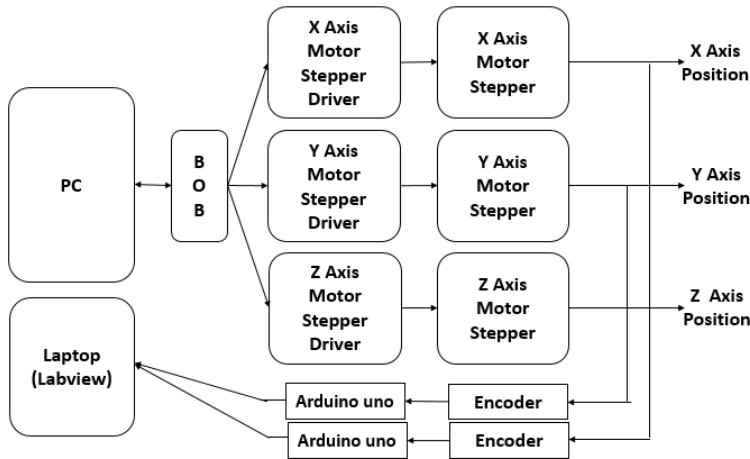
Tahapan penelitian yang dilakukan dalam menjawab rumusan masalah terdiri dari beberapa bagian. Tahapan penelitian dimulai dengan studi literatur, penentuan *deshired shape* produk yang akan dibuat, menentukan jenis benda kerja yang akan dibuat, menentukan langkah permesinan dan dilanjutkan dengan penyusunan G&M Code. Tahapan selanjutnya yang dilakukan adalah melakukan *software installation*, menentukan *hardware* lain yang dibutuhkan, menghubungkan ke mesin dan mengkonfigurasi Mach3 yang disesuaikan dengan DIY CNC Milling Machine. Langkah-langkah tersebut ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Tahapan Penelitian

Pada tahapan studi literatur penulis mempelajari tentang perancangan *plant* DIY CNC Milling Machine 3 Axis, dan metode yang digunakan didalam penelitian. Setelah penulis mempelajari tentang perancangan *plant*, kemudian penulis menentukan desain *plant* yang akan dibuat, dimana *plant* yang akan dibuat adalah prototipe dari CNC Milling Machine 3 axis *spindle movement*. Setelah penulis membuat *design plant* dari penelitian ini, kemudian penulis menentukan kebutuhan *hardware* apa saja yang diperlukan untuk merancang atau merealisasikan *plant* yang dirancang tersebut. Blok diagram dari sistem yang dirancang merupakan sistem pengaturan loop terbuka dimana ditunjukkan pada gambar 3.2. Setelah mendapatkan seluruh *hardware* yang dibutuhkan, penulis melakukan konstruksi mekanik dan elektirk dari *plant*. Setelah

mengkontruksi mekanik maupun elektrik dari plant, tahapan selanjutnya adalah melakukan konfigurasi pada *software* Mach3 yang berfungsi untuk menginterpretasikan kode instruksi (*part program*) kedalam gerakan pada mesin. Konfigurasi yang dilakukan antara lain penghitungan jumlah step dalam tiap unit, penentuan kecepatan pergerakan maksimum pada mesin, dan penentuan percepatan mesin saat memotong benda kerja. Tahapan terakhir adalah pengujian pada sistem.

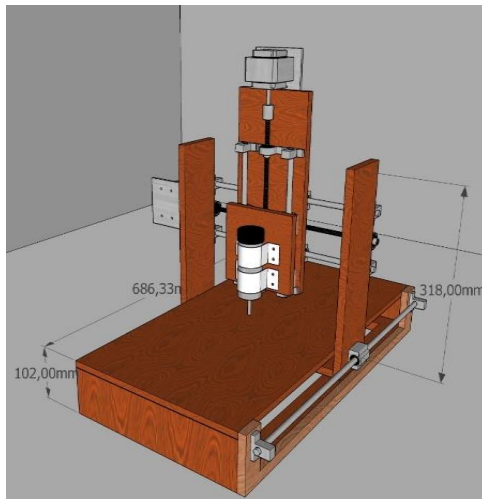


Gambar 3.2 Blok Diagram CNC Milling Machine yang Dirancang

Terlihat pada diagram blok bahwa terdapat encoder yang dihubungkan ke arduino uno. Dimana hal ini bertujuan untuk melakukan identifikasi respon plant ketika dilakukan pengujian beban minimal yang seakan akan memotong benda kerja.

3.1 Desain *Plant* DIY CNC Milling Machine

Pada tahapan ini, penulis mendesain DIY CNC Milling Machine yang dibuat. Dimana dimensi CNC Milling Machine yang dibuat berdimensi 350 x 680 x 320 mm.



Gambar 3.3. Desain DIY CNC *Milling Machine*

Plant tersebut digunakan untuk memotong, mengikis dan membentuk benda kerja dengan ukuran benda kerja maksimum berdimensi 300x600x50 mm. Selain itu pada tugas akhir kali ini, direncanakan bahwa *plant* tersebut dapat digunakan untuk memotong, mengikis dan membentuk benda kerja berbahan lunak berupa kayu, akrilik, PVC *board*.

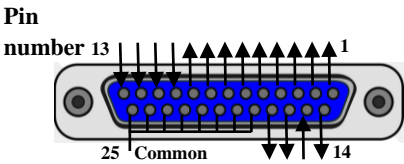
Kerangka dari *plant* berbahan dasar kayu sonokeling dengan ketebalan bahan 2 cm, sehingga *plant* tidak cocok digunakan untuk memotong benda kerja keras berbahan dasar besi. Hal ini akan menyebabkan vibrasi atau getaran pada *plant*. Pemilihan penggunaan kayu sonokeling dikarenakan kayu sonokeling tergolong kedlam kayu keras dengan bobot sedang. Selain itu, kayu ini tahan terhadap serangan rayap kayu kering dan sangat tahan terhadap jamur pembusuk kayu.

3.2 Hardware Requirement

Pada tahapan ini penulis menjabarkan *hardware* yang digunakan untuk merancang CNC *Milling Machine* agar dapat beroperasi sesuai dengan yang diinginkan.

3.2.1 *Pararel Port PC*

Pararel Port pada PC digunakan untuk menghubungkan antara perangkat keras sebagai masukan CNC maupun keluaran CNC. Pada tahapan ini memanfaatkan fungsi dari initial testing pada *software* Mach3. Tabel dibawah ini menunjukkan penggunaan tiap pin pada *pararel port*:



Tabel 3.1. *Role of Pin Breakout Board*

<i>DB 25 Pin Number</i>	<i>The Role of Pin on Breakout Board</i>	<i>Note</i>
1	PWM Control	PWM for controlling spindle motor speed
2	X Pul	X axis pulse signal
3	X Dir	X axis direction signal
4	Y Pul	Y axis pulse signal
5	Y Dir	Y axis direction signal
6	Z Pul	Z axis pulse signal
7	Z Dir	Z axis direction signal
8	A Pul	A axis pulse signal (not use)
9	A Dir	A axis direction signal (not use)
10	Input-1	Emergency Stop Button
11	Input-2	Not use
12	Input-3	Not use
13	Input-4	Not use
14	Relay control	On/off Coolant (not use)
15	Input-5	Not use
16	B Pul	B axis pulse signal (not use)

<i>DB 25 Pin Number</i>	<i>The Role of Pin on Breakout Board</i>	<i>Note</i>
17	B Dir	B axis direction signal (not use)
18-25	GND	

3.2.2 Leadscrew

Leadscrew (sekrup timbal), dikenal sebagai power screw atau translation screw, adalah sekrup yang digunakan sebagai penghubung mesin, untuk menterjemahkan gerakan rotasi kedalam gerakan linier. *Leadscrew* pada mesin CNC biasanya juga menggunakan brass nut sebagai aktuator yang akan menggerakkan benda kerja kearah sumbu positif maupun negatif.



Gambar 3.4. *Leadscrew Dengan Brass Nut*

Leadscrew yang digunakan pada plant memiliki panjang 60 mm dengan *lead* 8 mm dan pitch 2mm. Sehingga 1 revolusi putaran motor stepper akan diterjemahkan kedalam 8mm gerakan translasi.

3.2.3 Motor Stepper Driver

Pada penelitian kali ini penulis menggunakan TB6600 *Stepper motor driver* untuk melakukan microstepping agar motor stepper dapat berputar sesuai dengan yang diinginkan. Gambar 3.5 menunjukkan *driver* yang digunakan oleh penulis dalam penelitian ini.



Gambar 3.5. *Motor Stepper Driver*

Driver tersebut menggunakan IC Toshiba TB6600HG. IC tersebut merupakan PWM *choppertype singlechip bipolar sinusoidal microstep motor driver*. IC tersebut dapat melakukan kontrol rotasi depan dan mundur dengan fase eksitasi 1/1, 1/2, 1/4, 1/8, dan 1/16. Gambar 3.6 menunjukkan rangkain pada motor stepper driver dengan menggunakan IC Toshiba TB6600HG. Jika motor stepper yang digunakan langkah perstepnya adalah 1,8 derajat (200 step/rev) menggunakan fase eksitasi 1/2 maka motor tersebut tiap stepnya menjadi 0,9 derajat (400 step/rev). Lampiran C menunjukkan Skema Rangkaian *Stepper Motor Driver* TB6600HG.

Sinyal input yang terdapat pada motor stepper driver ada 3 macam, yaitu:

1. STEP
Sinyal input step berfungsi untuk menggerakkan motor stepper. Jumlah step pada sinyal step menentukan jumlah langkah putaran pada motor stepper. Dimana jumlah step tiap putaran pada motor stepper ditentukan oleh spesifikasi motor stepper dan mode eksitasi yang digunakan pada motor stepper driver.
2. DIR
Sinyal input Dir berfungsi untuk menentukan arah (*direction*) putaran motor stepper. Pada sinyal input Dir berlogika *High* maka motor stepper akan berputar searah dengan jarum jam. Dan pada sinyal input berlogika *Low* maka motor stepper akan berputar berlawanan jarum jam.
3. ENA
Sinyal input ENA pada *stepper motor driver* berfungsi untuk mengaktifkan atau menonaktifkan fungsi dari *stepper motor*

driver. Dimana pada saat di nonaktifkan, walaupun terdapat sinyal step yang masuk kedalam *motor stepper driver*, motor stepper driver tidak akan melakukan pensaklaran. Sehingga tidak ada putaran pada motor stepper.

3.2.4 Motor Stepper

Motor stepper yang digunakan pada perancangan sistem kali ini adalah motor stepper sanyo denki nema 23 unipolar. Spesifikasi dari motor stepper ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.2. Spesifikasi Motor Stepper

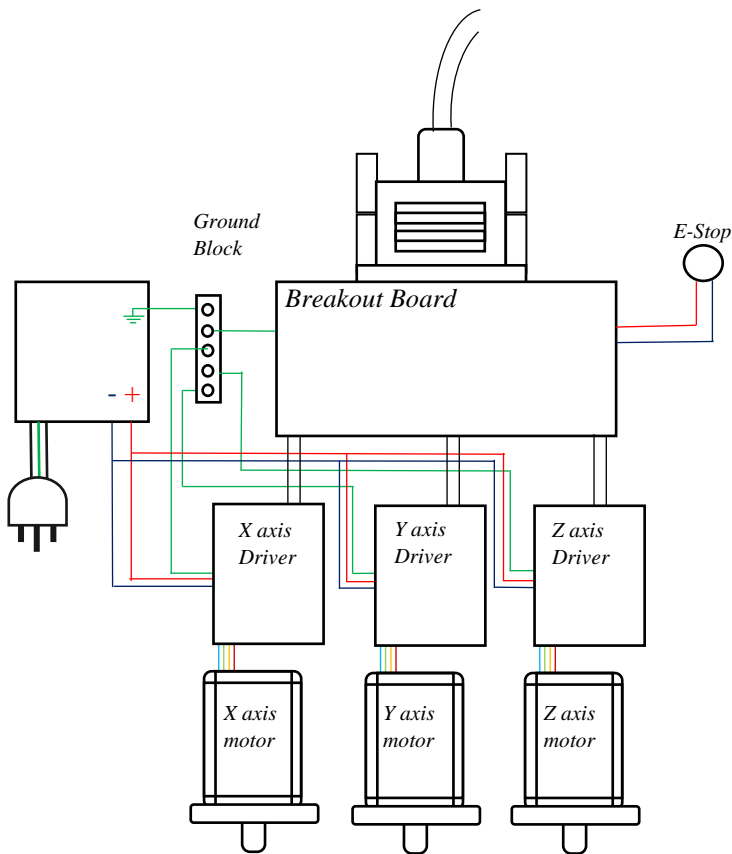
<i>Holding Torque</i>	0.5 N-m
<i>Rated Current</i>	3 A/phase
<i>Wiring Resistance</i>	0.9 ohm/phase
<i>Winding Inductance</i>	3.6 mH/phase
<i>Rotor inertia</i>	$0.14 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$

3.2.5 Motor Spindle

Motor spindle yang digunakan pada penelitian kali ini menggunakan *Air Cooled* Brush DC motor produk KAG Kahlig Antriebstechnik GmbH Germany dengan spesifikasi produk pada tabel dibawah ini:

Tabel 3.3. Spesifikasi Motor Spindle

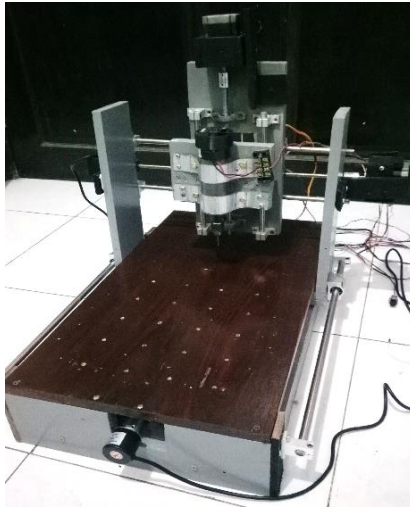
<i>Dimension</i>	d = 48 mm; p = 130 mm
<i>Operating Voltage</i>	24 V- 48 V
<i>Power</i>	300 W
<i>Stall Torque</i>	114
<i>Revolution Per Minute (RPM)</i>	4300 – 7200
<i>Weight</i>	900 gram
<i>Dimension shaft</i>	6 mm



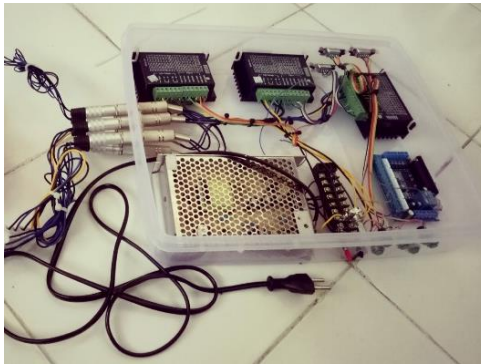
Gambar 3.9. *Wiring Diagram* masukan dan Keluaran Sistem

3.4 Konstruksi *Elektrical* dan *Mechanical Component*

Setelah menentukan kebutuhan *hardware*, tahapan selanjutnya adalah melakukan konstruksi baik *hardware* mekanik maupun elektrik. Dimana hasil konstruksi mekanik dan elektrik ditunjukkan pada gambar 3.10 dibawah ini.



a.



b.

Gambar 3.10 Hasil Konstruksi *CNC Milling Machine* yang dirancang a. Konstruksi Mekanik b. Konstruksi Elektrik

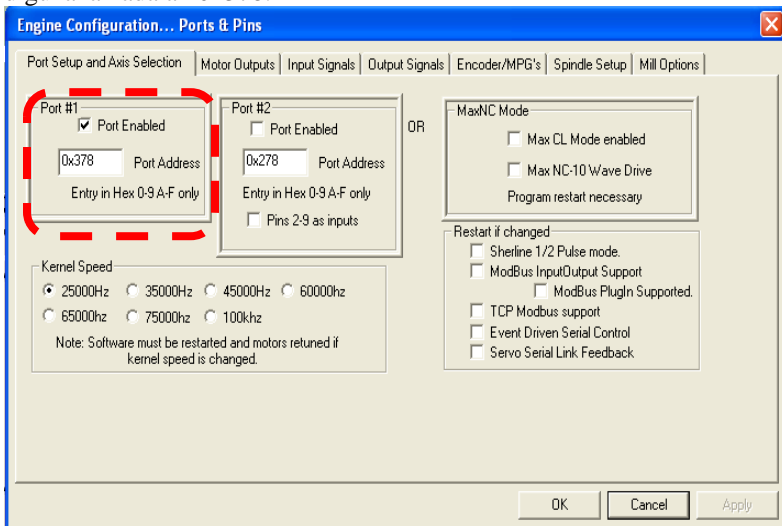
3.5 Konfigurasi Kontroler

Pada tahapan ini penulis melakukan konfigurasi pada Mach3, dimana penulis mencocokkan *hardware* yang ada pada mesin yang telah dilakukan uji coba tiap komponen dengan setting yang ada pada *software*

Mach3, hal ini dilakukan agar *software* Mach3 dapat berfungsi dengan baik saat dioperasikan untuk memotong, mengikis dan menyayat benda kerja.

3.5.1 Menentukan alamat *port* yang digunakan.

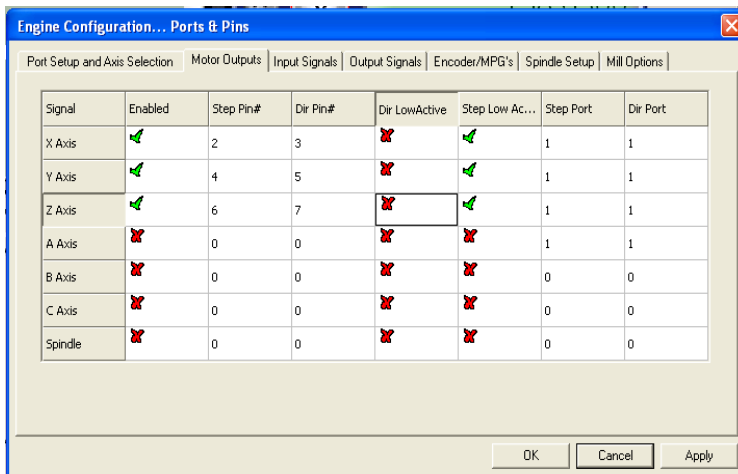
Pada tahapan ini, penulis menggunakan *Personal Computer* (PC) dimana *Pararel Port* sudah tersedia pada *Motherboard*. Sehingga, pengalamatan port pada Mach3 yang digunakan adalah 0x378 seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11 diatas. Alamat *port* 0x378 merupakan pengalamatan *port* secara *default*, dimana ketika *pararel port* terintegrasi secara langsung pada *motherboard* maka pengalamatan *port* yang digunakan adalah 0x378.



Gambar 3.11 Konfigurasi *Pararel Port*

3.5.2 Menentukan Input dan Output sinyal yang digunakan

Penentuan input dan output sinyal bertujuan untuk pengalamatan pada pin dan port berapa input / output sinyal tersebut dilakukan pengkabelan. Pengalamatan input dan output didasarkan pada tabel yang telah ditentukan sebelumnya pada tabel 3.2. gambar 3.12 dibawah menunjukkan proses konfigurasi input output pada Mach3.



Gambar 3.12 *Motor Output Set Up*

3.5.3 Tuning Motor

Tahapan ini merupakan tahapan konfigurasi pada Mach3 berkaitan dengan penggerak yang digunakan pada tiap axis. Tuning Motor merupakan tahapan paling utama didalam melakukan konfigurasi pada *Software* Mach3. Pada tahapan ini, hal yang harus ditentukan adalah jumlah step tiap unit, kecepatan maksimum motor dan percepatan motor pada tiap axis.

3.5.3.1 Menghitung Jumlah step yang harus dikirimkan tiap unit

Penentuan jumlah step merupakan tahapan yang dilakukan untuk mengatur berapa jumlah step yang harus dikirimkan untuk menggerakkan tool pada tiap satu unit. Dimana, satu unit pada penelitian ini adalah 1 mm. Jumlah step yang harus dikirimkan oleh Mach3 ke motor untuk menggerakkan 1 mm (unit) didasarkan pada mechanical drive, motor stepper dan microstep motor stepper driver yang digunakan. Tahapan pertama yang dilakukan adalah penentuan jumlah step dalam satu putaran revolusi, dan tahapan selanjutnya adalah penentuan jumlah step dalam 1 unit.

a. Penentuan jumlah step dalam satu putaran

Berdasarkan pada bab *hardware requirement* sebelumnya bahwa motor stepper yang digunakan pada penelitian ini memiliki jumlah step

dalam satu revolusi adalah 200 step. Dan penggunaan mode eksitasi microstepping yang digunakan adalah 1/16, maka:

Jumlah step per rev = jumlah step motor stepper / mode eksitasi (3.1)

Jumlah step per rev = $200 / (1/16)$

Jumlah step per rev = 3200

b. Penentuan jumlah step dalam satu unit

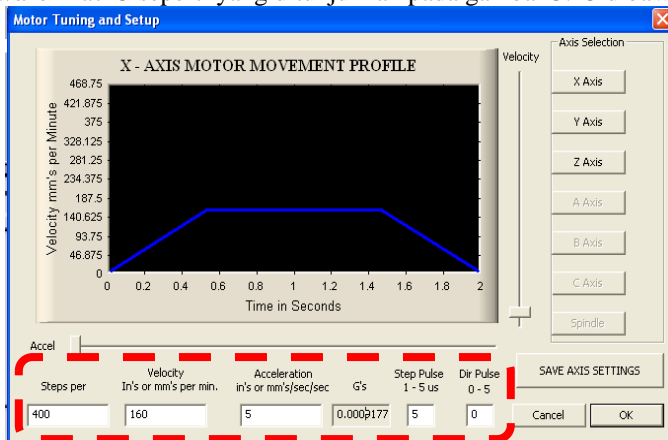
Penentuan jumlah step pada satu unit didasarkan pada *mechanical drive (Leadscrew)* yang digunakan, selain itu juga didasarkan pada jumlah step yang dikirimkan oleh Mach3 untuk memutar motor stepper satu putaran. Dikarenakan pada penelitian ini penulis menggunakan leadscrew dengan lead 8 mm maka untuk tiap 1 unit jumlah step yang harus dikirimkan adalah:

Jumlah step per unit = jumlah step per rev x Motor rev per unit (3.2)

Jumlah step per unit = 3200×0.125

Jumlah step per unit = 400

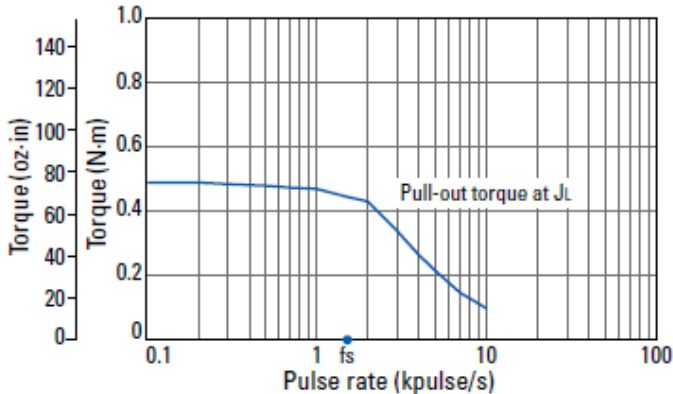
Nilai tersebut dimasukkan kedalam step per pada *motor tuning* didalam *software Mach3* seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.13 dibawah ini.



Gambar 3.13 Tuning Motor Stepper Pada Sumbu X

3.5.3.2 Penentuan Kecepatan maksimum

Pada tahapan ini penulis menentukan kecepatan maksimum yang diijinkan didalam pergerakan tool. Gambar 3.14 menunjukkan karakteristik torsi dari motor stepper sanyo denki yang digunakan.



Gambar 3.14 *Characteristic Diagram Motor Stepper SANYO Denki Tipe 103H6707-0741 Nema 23*

Terlihat pada gambar karakteristik dari motor stepper yang digunakan bahwa torsi akan menurun pada frekuensi 1100 Pulse/s, maka hal ini yang digunakan dasar bahwa kecepatan maksimum dari pergerakan spindle adalah 2.75 mm/s atau 165 mm/min. Gambar 3.13 menunjukkan pengaturan kecepatan maksimum pada Mach3. Kecepatan ini adalah kecepatan maksimum yang digunakan didalam pemakanan benda kerja agar tidak dihasilkan *contour error* yang dikarenakan penurunan torsi motor.

BAB 4

PENGUJIAN DAN ANALISA

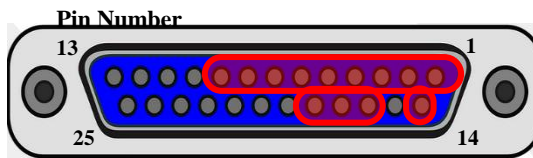
Plant DIY CNC Milling Machine yang telah dibuat akan dilakukan pengujian. Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik pada CNC yang telah dirancang. Pengujian pertama-tama yang dilakukan adalah unit testing, kemudian integrity testing, dan pengujian pemotongan dan pemakanan benda kerja (*operational testing*).

4.1 Unit Testing

Unit testing dilakukan untuk mengetahui apakah tiap komponen yang digunakan dapat berfungsi sesuai dengan spesifikasi yang telah ditentukan. Berikut unit testing pada tiap komponen CNC Milling Machine.

4.1.1 Pararel Port

Pararel port merupakan *Input / output interface* dari komputer ke mesin. Tahapan pertama yang dilakukan adalah pengecekan pin *output* pada *pararel port* apakah tiap pin *output* berfungsi sebagai mestinya atau tidak. Pengecekan tersebut dilakukan dengan menggunakan bantuan *software* Mach3 untuk mengetahui tegangan keluaran pada tiap pin. Dikarenakan *pararel port* pada PC merupakan *port female*, maka diperlukan *paperclip* yang digunakan untuk mengetahui tegangan *output* pada *port*. Kemudian, diukur menggunakan voltmeter dimana diamati tegangan output ketika sinyal keluaran berlogika 1 (*High*) dan ketika sinyal keluaran berlogika 0 (*Low*). Sinyal logika *high* dan *low* didapatkan melalui bantuan *software* Mach3 dengan melakukan *setting input output* pin pada *software*. Pin *output* pada *pararel port* ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar 4.1. Pin Output Pada Pararel Port

Hasil *unit testing* pada tiap pin output ditunjukkan pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Tegangan Keluaran Tiap Pin Output

No. Pin	High (1) (Volt)	Low (0) (Volt)	No. Pin	High (1) (Volt)	Low (0) (Volt)
1	3.42	0.15	8	3.42	0.15
2	3.42	0.15	9	3.42	0.15
3	3.42	0.15	14	3.42	0.15
4	3.42	0.15	16	3.62	0.14
5	3.42	0.15	17	3.62	0.14
6	3.42	0.15	18	3.62	0.14

Hasil *unit testing* pada *pararel port* ditunjukkan pada gambar 4.2



(a)

(b)

Gambar 4.2 (a) Tegangan *output pararel port* (Low) (b) Tegangan *output pararel port* (High)

4.1.1 Unit testing Breakout Board

Pada tahapan ini dilakukan pengecekan pada pin masukan dan keluaran pada *breakout board*. Dimana pada pin keluaran *breakout board* apabila berfungsi normal, maka ketika keluaran pada pin output *pararel port* bernilai high maka pada keluaran *breakout board* tegangan yang terbaca antara 4 - 5 V dan apabila logika bernilai *low*, maka tegangan yang terbaca antara 0 - 1 V. Gambar 4.2 menunjukkan dokumentasi tegangan

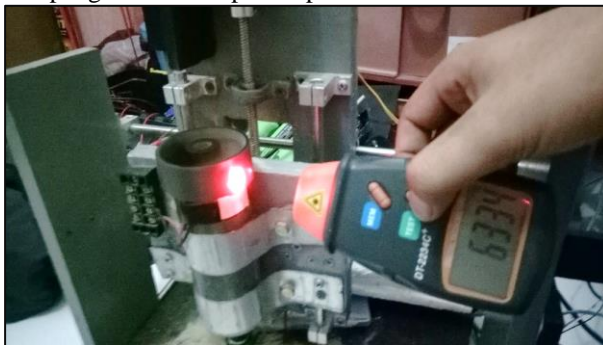
pada *breakout board* ketika berlogika *low* dan *high*. Tabel 4.2 menunjukkan nilai tegangan pada tiap pin output breakout board.

Tabel 4.2. Nilai Tegangan Keluaran Pada *Breakout Board*

No. Pin	High (1) (Volt)	Low (0) (Volt)	No. Pin	High (1) (Volt)	Low (0) (Volt)
1	4.6	0.15	8	4.65	0.15
2	4.6	0.15	9	4.65	0.15
3	4.6	0.15	14	4.65	0.15
4	4.6	0.15	16	4.60	0.14
5	4.6	0.15	17	4.60	0.14
6	4.65	0.15	18	4.60	0.14
7	4.65	0.15			

4.1.2 Unit testing Motor Spindle

Pada tahapan ini dilakukan pemberian tegangan pada motor spindle sebesar 36 V, kecepatan pada motor spindle diukur dengan tachogenerator dimana ketika amati kecepatan motor spindle saat pemberian tegangan 36 V sebesar 6300 rpm tanpa beban. Gambar 4.2 menunjukkan dokumentasi pengujian dan pengukuran kecepatan spindle.



Gambar 4.3 Pengujian Kecepatan Putaran Spindle pada tegangan 36V

4.1.3 Unit testing Motor Spindle Driver

Pada tahapan ini dilakukan pengujian dengan pemberian variasi *duty cycle* pada Motor spindle driver dimana tegangan input sebesar 36 V. Tabel 4.3 menunjukkan besarnya tegangan keluaran *motor spindle driver* dengan variasi *duty cycle*.

Tabel 4.3. Tegangan Output Terhadap Variasi Duty Cycle

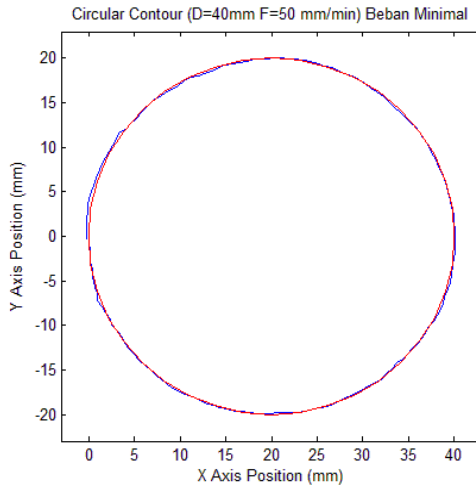
No.	Duty Cycle	Tegangan Output
1	0%	0.12
2	10%	3.65
3	30%	10.9
4	50%	18.2
5	60%	21.68
6	80%	29.2
7	100%	36.2

4.2 Pengujian Beban Minimal

Pengujian pertama yang dilakukan oleh penulis adalah pengujian beban minimal. Pengujian beban minimal merupakan tahapan pengujian dimana *plant* bergerak seakan akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran. Dimana pergerakan dari *plant* akan diamati dengan menggunakan encoder untuk mengetahui respon dari *plant* ketika bergerak mengikuti kontur lingkaran. Pada pengujian ini dilakukan pengujian dengan kecepatan pemakanan (*feedrate*) adalah 50 mm/min, 100 mm/min dan 150 mm/min.

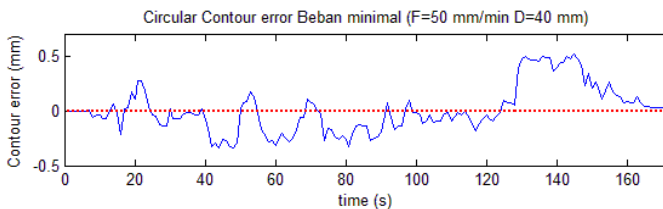
4.2.1 Pengujian Beban Minimal Dengan Feedrate 50 mm/min

Pengujian beban minimal pertama kali yang dilakukan adalah pengujian pergerakan motor spindle seakan akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran. Pada pengujian ini, motor spindle seakan akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran berdiameter 40 mm dengan kecepatan pemakanan 50 mm/min dan percepatan disesuaikan dengan *setting acceleration* pada bab 3 diatas, dimana percepatannya adalah 5 mm/s². Pengujian ini dilakukan pada 1 cycle pemakanan. Gambar 4.3 dibawah menunjukkan hasil *tracking circular contour* pada DIY CNC Milling Machine yang dirancang.



Gambar 4.4 Pembentukan Kontur Lingkaran Pada Beban Minimal Dengan *Feedrate* 50 mm/min Percepatan 5 mm/s² dan Diameter Lingkaran 40 mm.

Dari pembentukan kontur tersebut dihasilkan kesalahan kontur yang ditunjukkan pada gambar 4.3 dibawah dimana terlihat bahwa eror yang terjadi berisolosi pada *range error* -0.4 mm hingga 0.4 mm. Nilai minus pada *contour error* menunjukkan bahwa hasil pengujian kurang dari nilai / *set point* yang diinginkan. Sedangkan nilai plus pada *contour error* menunjukkan bahwa hasil pengujian lebih dari nilai / *set point* yang diinginkan.



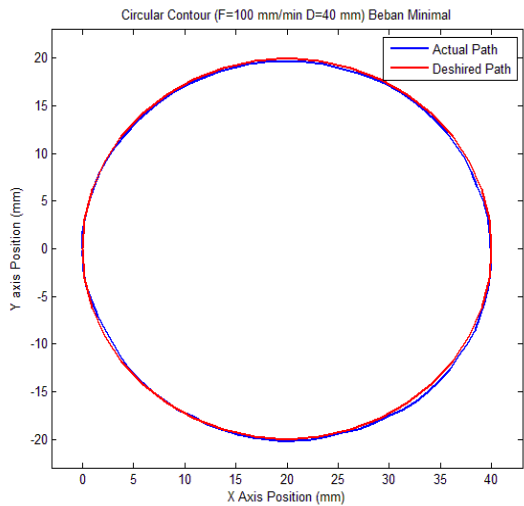
Gambar 4.5 Kesalahan Kontur Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 Mm Dengan *Feedrate* 50 mm/min dan Percepatan 5 mm/s²

Pengujian ini dilakukan sebanyak 3 kali, tabel 4.4 menunjukkan *mean error* (ME) dan *mean percentage error* (MPE) yang terdapat pada tiap pengujian. Terlihat pada tabel 4.4 bahwa pada pengujian beban minimal seakan-akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran menghasilkan ME sebesar 0.0132 mm dan MPE sebesar 0.0661 %

Tabel 4.4 Pengujian Beban Minimal Dengan *Feedrate* 50 mm/min, percepatan 5 mm/s² Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm

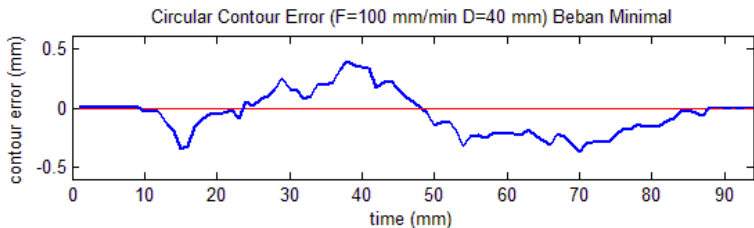
No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Persentage Error (MPE)
1	0.0124	0.0622
2	0.1213	0.0605
3	-0.0151	-0.0756
Rata-rata	0.0132	0.0661

4.2.2 Pengujian Beban Minimal Dengan Feedrate 100 mm/min



Gambar 4.6 Hasil Kontur Pengujian Beban Minimal Mengikuti Kontur Lingkaran Dengan *Feedrate* 100 mm/min, percepatan 5 mm/s², diameter lingkaran 40 mm

Setelah dilakukan pengujian beban minimal dengan *feedrate* 50 mm/min, selanjutnya dilakukan pengujian dengan *feedrate* 100 mm/min. Dimana pada pengujian ini, untuk parameter percepatan dan diameter lingkaran yang seakan-akan dipotong sama. Gambar 4.6 diatas menunjukkan hasil *tracking* pada *plant* seakan-akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran. Kontur rer yang terjadi pada saat seakan-akan memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran dengan *feedrate* 100 mm/min ditunjukkan pada gambar 4.7 dibawah ini.



Gambar 4.7 Kesalahan Kontur Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 mm Dengan *Feedrate* 100 mm/min dan Percepatan 5 mm/s²

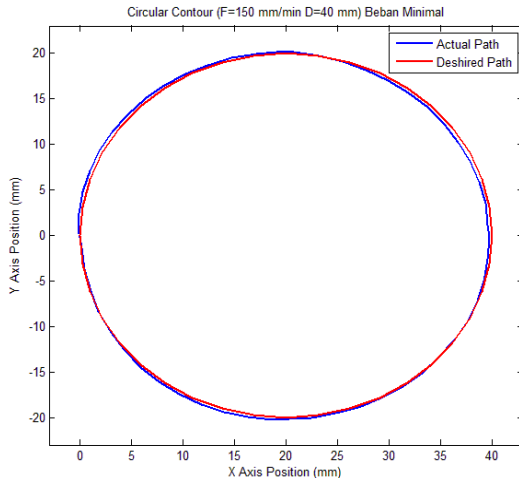
Sama halnya seperti pada pangujian sebelumnya, bahwa pengujian beban minimal dengan *Feedrate* 100 mm/min ini dilakukan sebanyak 3 kali percobaan. Tabel 4.5 dibawah ini menunjukkan ME dan MPE hasil pengujian pada tiap percobaan. Terlihat pada tabel bahwa rata-rata ME yang terjadi pada tiap percobaan adalah 0.1235 mm dan rata-rata MPE adalah 0.23507 %

Tabel 4.5 Pengujian Beban Minimal Dengan *Feedrate* 100 mm/min Percepatan 5 mm/s² Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm

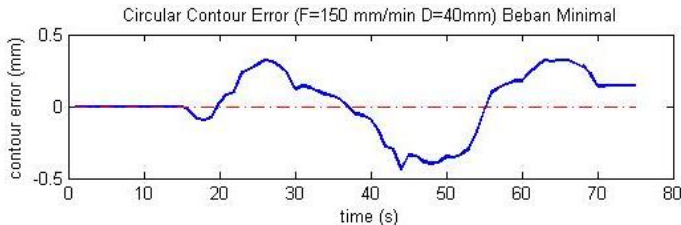
No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	-0.0514	-0.2569
2	0.0641	0.3207
3	0.255	0.1276
Rata-rata	0.1235	0.23507

4.2.3 Pengujian Beban Minimal Dengan *Feedrate* 150 mm/min

Setelah dilakukan pengujian beban minimal dengan *Feedrate* 100 mm/min pada plant, selanjutnya pengujian yang dilakukan adalah pengujian beban minimal dengan *feedrate* 150 mm/min. Dimana, pada pengujian ini, parameter percepatan dan diameter lingkaran dibuat sama dengan pengujian sebelumnya. Dimana, percepatan 5 mm/s^2 dan diameter lingkaran adalah 40 mm. Didapatkan hasil kontur pengujian ditunjukkan pada gambar 4.8. dan kesalahan kontur yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.9



Gambar 4.8 Hasil Kontur Pengujian Beban Minimal Mengikuti Kontur Lingkaran Dengan *Feedrate* 150 mm/min, Percepatan 5 mm/s^2 dan Diameter 40 mm



Gambar 4.9 *Contour Error* Beban Minimal Dengan Diameter Pemotongan 40 mm Dengan *Feedrate* 50 mm/min dan Percepatan 5 mm/s^2

Pengujian ini dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian pada tiap tiap percobaan menghasilkan ME dan MPE yang ditunjukkan pada tabel 4.6 dibawah ini.

Tabel 4.6 Pengujian Beban Minimal Dengan *Feedrate* 150 mm/min Percepatan 5 mm/s^2 Seakan-akan Memotong Mengikuti Kontur Lingkaran Berdiameter 40 mm

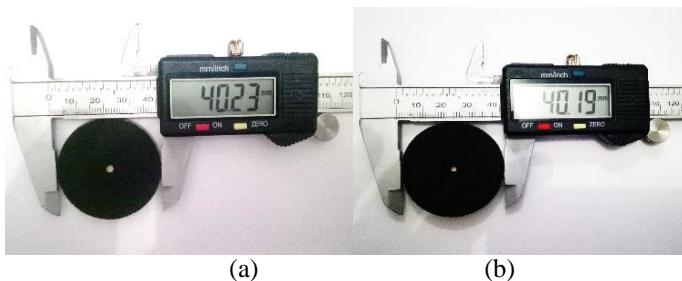
No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.0261	0.1307
2	-0.0655	-0.3274
3	0.0690	0.3449
Rata-rata	0.5353	0.2677

4.3 Pengujian Beban Nominal

Pada percobaan pengujian beban nominal, penulis ingin mengetahui karakteristik dari plant yang dirancang untuk memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran.. Dimana benda kerja yang digunakan dalam pengujian adalah benda kerja berbahan kayu *softboard* dan akrilik.

4.3.1 Pengujian beban nominal memotong *softboard*

Pada pengujian ini, plant yang telah dirancang akan mencoba memotong benda kerja berbahan *softboard* dengan ketebalan 1.5 mm. Parameter pengujian yang digunakan adalah variasi *feedrate* (50 mm/min, 100 mm/min, dan 150 mm/min), diameter lingkaran yang dipotong adalah 40 mm. Kedalaman potong (*depht of cut*) tiap cycle adalah 0.5 mm.



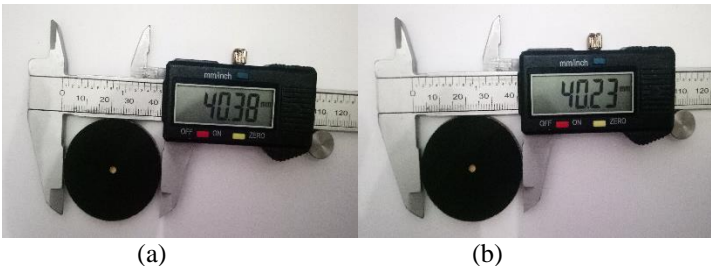
Gambar 4.10 Hasil Pemotongan Benda Kerja *Softboard* a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek

Percobaan pemotongan pada *softboard* dilakukan sebanyak 3 kali dimana hasil dari ME dan MPE tiap pengujian ditunjukkan pada tabel 4.7 dibawah ini.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada *Softboard* Dengan *Feedrate* 50 mm/min, Percepatan 5 mm/s² dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.21	0.525
2	0.24	0.6
3	0.30	0.75
Rata-rata	0.25	0.625

Setelah pengujian pada nilai *feedrate* 50 mm/min, kemudian dilakukan pengujian dengan *feedrate* 100 mm/min. Gambar 4.11 menunjukkan hasil pemotongan benda kerja mengikuti kontur lingkaran dengan *feedrate* 100 mm/min.



Gambar 4.11 Hasil Pemotongan Benda Kerja *Softboard* Dengan *Feedrate* 100 mm/min a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek

Percobaan pemotongan dengan parameter *Feedrate* 100 mm/min, percepatan 5 mm/s² dan *depth of cut* 0.5 mm dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil ME dan MPE tiap pengujian ditunjukkan pada tabel 4.8

Tabel 4.8 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada *Softboard* Dengan *Feedrate* 100 mm/min, Percepatan 5 mm/s² dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.305	0.7625
2	0.206	0.515
3	0.295	0.7375
Rata-rata	0.2687	0.6718

Pengujian terakhir pada tahap pemotongan benda kerja berbahan *softboard* adalah pengujian dengan *feedrate* 150 mm/min. Dimana hasil pemotongan yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.12



Gambar 4.12 Hasil Pemotongan Benda Kerja *Softboard* Dengan *Feedrate* 150 mm/min a. Diameter Terpanjang b. Diameter Terpendek

Percobaan pemotongan benda kerja *softboard* mengikuti kontur lingkaran dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil ME dan MPE pada pengujian benda kerja berbahan *softboard* ditunjukkan pada tabel 4.9 dibawah ini.

Tabel 4.9 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada *Softboard* Dengan *Feedrate* 150 mm/min, Percepatan 5 mm/s² dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.355	0.8875
2	0.302	0.755
3	0.327	0.8175
Rata-rata	0.328	0.82

4.3.2 Pengujian beban nominal memotong akrilik

Pada pengujian ini, plant yang telah dirancang akan mencoba memotong benda kerja berbahan akrilik dengan ketebalan 1.5 mm. Parameter pengujian yang digunakan adalah variasi *feedrate* (50 mm/min, 100 mm/min, dan 150 mm/min), diameter lingkaran yang dipotong adalah 37 mm. Kedalaman potong (*depth of cut*) tiap *cycle* adalah 0.5 mm.

Hasil pengujian memotong benda kerja berbahan akrilik mengikuti kontur lingkaran dengan parameter *feedrate* 50 mm/min ditunjukkan pada gambar 4.13 dibawah. Dimana diameter lingkaran yang diinginkan adalah 37 mm.



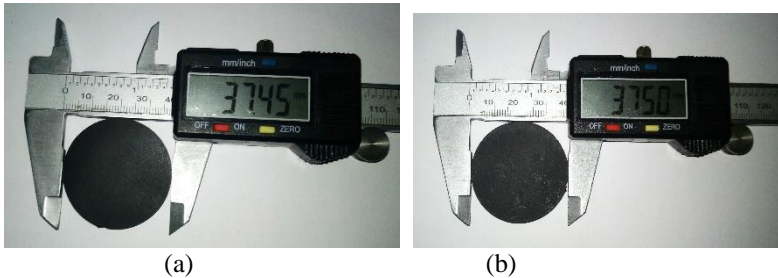
Gambar 4.13 Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan *Feedrate* 50 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang

Pada pengujian pemotongan benda kerja berbahan akrilik dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil pengujian berupa ME dan MPE ditunjukkan pada tabel 4.10 dibawah ini.

Tabel 4.10 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan *Feedrate* 50 mm/min, Percepatan 5 mm/s² dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.405	1.0945
2	0.455	1.223
3	0.455	1.223
Rata-rata	0.438	1.174

Setelah pengujian pada nilai *feedrate* 50 mm/min, kemudian dilakukan pengujian dengan *feedrate* 100 mm/min. Gambar 4.13 menunjukkan hasil pemotongan benda kerja mengikuti kontur lingkaran dengan *feedrate* 100 mm/min.



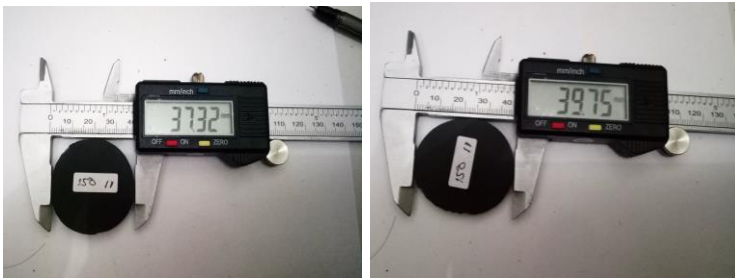
Gambar 4.14 Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan *Feedrate* 100 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang

Percobaan pemotongan dengan parameter *Feedrate* 100 mm/min, percepatan 5 mm/s² dan *depth of cut* 0.5 mm dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil ME dan MPE tiap pengujian ditunjukkan pada tabel 4.11

Tabel 4.11 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan *Feedrate* 100 mm/min, Percepatan 5 mm/s² dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	0.475	1.283
2	0.496	1.337
3	0.630	1.703
Rata-rata	0.533	1.441

Pengujian terakhir pada tahap pemotongan benda kerja berbahan akrilik adalah pengujian dengan *feedrate* 150 mm/min. Dimana hasil pemotongan yang dihasilkan ditunjukkan pada gambar 4.14



Gambar 4.15 Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Dengan *Feedrate* 150 mm/min a. Diameter Terpendek b. Diameter Terpanjang

Percobaan pemotongan benda kerja akrilik mengikuti kontur lingkaran dilakukan sebanyak 3 kali. Hasil ME dan MPE pada pengujian benda kerja berbahan akrilik ditunjukkan pada tabel 4.12 dibawah ini.

Tabel 4.12 Hasil Pengujian Beban Nominal Pada Akrilik Dengan *Feedrate* 150 mm/min, Percepatan 5 mm/s^2 dan *Depth Of Cut* 0.5 mm

No. Percobaan	Mean Error (ME)	Mean Percentage Error (MPE)
1	1.535	4.148
2	1.275	3.440
3	1.365	3.689
Rata-rata	1.39	3.759

4.3.3 Pengujian Pemotongan benda kerja mengikuti kombinasi kontur circular dan linier

Pada tahapan ini dilakukan pengujian pemotongan benda kerja dimana *deshired shape* yang diinginkan merupakan kombinasi dari interpolasi linier dan circular. Pembentukan *deshired shaped* dibuat melalui *software* Aspire 8.5 yang merupakan *software* CAD/CAM. Melalui *software* tersebut akan dibentuk desain hasil pemotongan, yang kemudian dilakukan perencanaan proses pemotongan hingga didapatkan

part program yang dapat diaplikasikan pada *plant*. Gambar 4.15 merupakan gambar *deshired shape* (desain produk pemotongan) yang diinginkan didalam pengujian kali ini.



Gambar 4.16 Desain Produk Pemotongan Benda Kerja Kombinasi Interpolasi Circular dan Linier.

Setelah didapatkan *part program* dari *deshired shape* yang dibuat, maka langkah selanjutnya adalah merealisasikannya kedalam mesin melalui *software Mach3*. Gambar 4.17 dibawah ini menunjukkan hasil pemotongan pada benda kerja *softboard* untuk merealisasikan desain produk yang dibuat.



Gambar 4.17 Hasil Produk Pemotongan Benda Kerja Kombinasi Interpolasi Circular dan Linier.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian yang telah dilakukan dan kendala yang dihadapi selama proses pengerjaan dimuat dalam kesimpulan dan saran.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa *plant* hasil perancangan dengan spesifikasi 0.0025 mm tiap step dengan sistem pengaturan loop terbuka mampu untuk memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran dengan hasil pengujian sebagai berikut:

- a. Pada beban minimal menghasilkan MPE sebesar 0,0661% pada *feedrate* 50 mm/min, 0,235% pada *feedrate* 100 mm/min dan meningkat menjadi 0,2677% pada *feedrate* 150 mm/min.
- b. Pada beban nominal memotong benda kerja *softboard* menghasilkan MPE sebesar 0,625% pada *feedrate* 50 mm/min, 0,6718% pada *feedrate* 100 mm/min dan 0,82% pada *feedrate* 150 mm/min.
- c. Pada beban nominal memotong benda kerja akrilik menghasilkan MPE sebesar 1.17% pada *feedrate* 50 mm/min, 1,703% pada *feedrate* 100 mm/min dan meningkat menjadi 3,75% pada *feedrate* 150 mm/min.

5.2 Saran

Beberapa saran yang perlu diberikan untuk penelitian selanjutnya antara lain :

1. Dalam perancangan mesin CNC *Milling Machine* sebaiknya menggunakan besi, atau alumunium sebagai bahan utama dari bodi mesin.
2. Pada implementasi DIY CNC *Milling Machine*, perlu adanya perancangan sistem pengaturan yang lebih rumit yang mampu memperbaiki kontur error yang terjadi saat melakukan pemotongan / pembentukan benda kerja.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Sumbudo, W., Pujiono, S., Dkk, "Teknik Produksi Mesin Industri- Jilid 2", Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan, Departemen Pendidikan Nasional, 2008.
- [2] Y. Koren, "*Control of Machine Tools*," *Journals of Manufacturing Science and Engineering*, 749-755, 1997.
- [3] Y. Koren and C. C. Lo, "*Advanced Controller for Feed Drives*," *Annals of the CIRP*, 689-698, 1992.
- [4] Y. Koren, "*Design Of Computer Control for Manufacturing System*," *Journal Of Engineering For Industry Vol 101*, 326-332, 1979.
- [5] A. USA, "*Mach3 CNC Controller Software Installation and Configuration*," 2008.
- [6] S. Suh, S. Kang, D. Chung & I. Stroud, "*Theory and Design of CNC System*," Springer, 2008.
- [7] Overby, Alan, "*CNC Machining Handbook (Building, Programming, and Implementation)*," Mc Graw Hill, 2011.
- [8] Nurhadi, H. And Tarng, Yeong-Shin., "*Open- and Closed-Loop System of Computer Integrated Desktop-Scale CNC Machine*" *IFAC Proceeding Vol 42*, 222-226, 2010.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]

LAMPIRAN A

1. Pembuatan *Part Program* Pengujian Beban Minimal

Pada pengujian beban minimal, terlebih dahulu dilakukan pembuatan part program sebagai berikut ini.

```
N10 G00 X0 Y0 Z0 F120;  
N20 G03 X20 Y-20 R20;  
N30 G03 X40 Y0 R20;  
N40 G03 X20 Y20 R20;  
N50 G03 X0 Y0 R20;
```

2. Pembuatan *Part Program* Pengujian Beban Nominal

Pada pengujian beban nominal dalam pemotongan benda kerja akrilik dan softboard, dilakukan pembuatan part program sebagai berikut ini.

a. *Part Program* Pemotongan Benda Kerja Dengan *Feedrate* 50 mm/min

(*Part Program Feedrate* 50 mm/min memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran)
(for Mach2/3 from Vectric)
(Material Size)
(X= 140.000, Y= 140.000 ,Z= 14.000)

```
()  
(Toolpaths used in this file:)  
(Profile 12)  
(Tools used in this file: )  
(1 = Ball Nose {2.5 mm})  
N120G00G21G17G90G40G49G80  
N130G71G91.1  
N140T1M06  
N150 (Ball Nose {2.5 mm})  
N160G00G43Z20.000H1  
N170S16000M03  
N180 (Toolpath:- Profile 12)  
N190()  
N200G94  
N210X0.000Y0.000F50.0  
N220G00X3.018Y23.135Z6.000
```


N230G1X3.018Y23.135Z-0.333F50.0
 N240G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F50.0
 N250G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N260G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N270G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N280G1X3.018Y23.135Z-0.667F100.0
 N290G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F50.0
 N300G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N310G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N320G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N330G1X3.018Y23.135Z-1.000F100.0
 N340G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F50.0
 N350G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N360G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N370G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N380G1X3.018Y23.135Z-1.333F100.0
 N390G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F50.0
 N400G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N410G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N420G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N430G1X3.018Y23.135Z-1.667F100.0
 N440G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F50.0
 N450G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N460G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N470G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N480G1X3.018Y23.135Z-2.000F100.0
 N490G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N500G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N510G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N520G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N530G00X3.018Y23.135Z6.000
 N540S16000M03

b. Part Program Pemotongan Benda Kerja Dengan Feedrate 100 mm/min

(Part Program Feedrate 100 mm/min memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran)
 (for Mach2/3 from Vectric)
 (Material Size)

(X= 140.000, Y= 140.000 ,Z= 14.000)
 ()
 (Toolpaths used in this file:)
 (Profile 13)
 (Tools used in this file:)
 (1 = Ball Nose {2.5 mm})
 N120G00G21G17G90G40G49G80
 N130G71G91.1
 N140T1M06
 N150 (Ball Nose {2.5 mm})
 N160G00G43Z20.000H1
 N170S16000M03
 N180(Toolpath:- Profile 13)
 N190()
 N200G94
 N210X0.000Y0.000F100.0
 N220G00X3.018Y23.135Z6.000
 N230G1X3.018Y23.135Z-0.333F100.0
 N240G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N250G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N260G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N270G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N280G1X3.018Y23.135Z-0.667F100.0
 N290G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N300G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N310G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N320G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N330G1X3.018Y23.135Z-1.000F100.0
 N340G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N350G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N360G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N370G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N380G1X3.018Y23.135Z-1.333F100.0
 N390G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N400G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N410G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N420G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N430G1X3.018Y23.135Z-1.667F100.0
 N440G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0

N450G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N460G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N470G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N480G1X3.018Y23.135Z-2.000F100.0
 N490G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F100.0
 N500G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N510G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N520G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N530G00X3.018Y23.135Z6.000
 N540S16000M03

c. Part Program Pemotongan Benda Kerja Dengan Feedrate 50 mm/min

(Part Program Feedrate 150 mm/min memotong benda kerja mengikuti kontur lingkaran)

(for Mach2/3 from Vectric)

(Material Size)

(X= 140.000, Y= 140.000 ,Z= 14.000)

()

(Toolpaths used in this file:)

(Profile 14)

(Tools used in this file:)

(1 = Ball Nose {2.5 mm})

N120G00G21G17G90G40G49G80

N130G71G91.1

N140T1M06

N150 (Ball Nose {2.5 mm})

N160G00G43Z20.000H1

N170S16000M03

N180(Toolpath:- Profile 14)

N190()

N200G94

N210X0.000Y0.000F100.0

N220G00X3.018Y23.135Z6.000

N230G1X3.018Y23.135Z-0.333F150.0

N240G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0

N250G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250

N260G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000

N270G2X3.018Y23.135I0.000J21.250

N280G1X3.018Y23.135Z-0.667F100.0
 N290G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0
 N300G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N310G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N320G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N330G1X3.018Y23.135Z-1.000F100.0
 N340G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0
 N350G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N360G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N370G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N380G1X3.018Y23.135Z-1.333F100.0
 N390G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0
 N400G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N410G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N420G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N430G1X3.018Y23.135Z-1.667F100.0
 N440G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0
 N450G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N460G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N470G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N480G1X3.018Y23.135Z-2.000F100.0
 N490G2X24.268Y44.385I21.250J0.000F150.0
 N500G2X45.518Y23.135I0.000J-21.250
 N510G2X24.268Y1.885I-21.250J0.000
 N520G2X3.018Y23.135I0.000J21.250
 N530G00X3.018Y23.135Z6.000
 N540S16000M03

3. Pembuatan *Part Program* Memotong Benda Kerja Mengikuti Kombinasi Interpolasi Linier dan Circular

Pada pengujian beban nominal untuk memotong benda kerja mengikuti suatu kontur yang merupakan kombinasi linier dan circular seperti ditunjukkan pada gambar 4.16 adalah sebagai berikut:

(contouring Dr. Ir. Rameli)

(File created: Monday July 02 2018 - 06:51 PM)

(for Mach2/3 from Vectric)

(Material Size)

(X= 100.000, Y= 70.000 ,Z= 14.000)

()

(Toolpaths used in this file:)

(Profile 2)

(Profile 3)

(Profile 4)

(Profile 5)

(Profile 6)

(Profile 7)

(Profile 8)

(Profile 9)

(Profile 10)

(Profile 1)

(Tools used in this file:)

(1 = Ball Nose {2.5 mm})

N190G00G21G17G90G40G49G80

N200G71G91.1

N210T1M06

N220 (Ball Nose {2.5 mm})

N230G00G43Z20.000H1

N240S16000M03

N250(Toolpath:- Profile 2)

N260()

N270G94

N280X0.000Y0.000F1200.0

N290G00X5.456Y5.412Z6.000

N300G1X5.456Y5.412Z-0.300F120.0

N310G1X5.065Y5.842Z-0.300F120.0

N320G1X4.716Y6.309Z-0.300

N330G1X4.412Y6.809Z-0.300

N340G1X4.156Y7.340Z-0.300

N350G1X3.952Y7.898Z-0.300

N360G1X3.802Y8.480Z-0.300

N370G1X3.710Y9.082Z-0.300

N380G1X3.680Y9.674Z-0.300

N390G1X3.680Y59.728Z-0.300

N400G1X3.710Y60.320Z-0.300
N410G1X3.802Y60.922Z-0.300
N420G1X3.952Y61.504Z-0.300
N430G1X4.156Y62.062Z-0.300
N440G1X4.412Y62.593Z-0.300
N450G1X4.716Y63.093Z-0.300
N460G1X5.065Y63.560Z-0.300
N470G1X5.456Y63.990Z-0.300
N480G1X5.886Y64.381Z-0.300
N490G1X6.353Y64.730Z-0.300
N500G1X6.853Y65.034Z-0.300
N510G1X7.384Y65.290Z-0.300
N520G1X7.942Y65.494Z-0.300
N530G1X8.524Y65.644Z-0.300
N540G1X9.126Y65.736Z-0.300
N550G1X9.718Y65.766Z-0.300
N560G1X89.772Y65.766Z-0.300
N570G1X90.364Y65.736Z-0.300
N580G1X90.966Y65.644Z-0.300
N590G1X91.548Y65.494Z-0.300
N600G1X92.106Y65.290Z-0.300
N610G1X92.637Y65.034Z-0.300
N620G1X93.137Y64.730Z-0.300
N630G1X93.604Y64.381Z-0.300
N640G1X94.034Y63.990Z-0.300
N650G1X94.425Y63.560Z-0.300
N660G1X94.774Y63.093Z-0.300
N670G1X95.078Y62.593Z-0.300
N680G1X95.334Y62.062Z-0.300
N690G1X95.538Y61.504Z-0.300
N700G1X95.688Y60.922Z-0.300
N710G1X95.780Y60.320Z-0.300
N720G1X95.810Y59.728Z-0.300
N730G1X95.810Y9.674Z-0.300
N740G1X95.780Y9.082Z-0.300
N750G1X95.688Y8.480Z-0.300
N760G1X95.538Y7.898Z-0.300
N770G1X95.334Y7.340Z-0.300
N780G1X95.078Y6.809Z-0.300

N790G1X94.774Y6.309Z-0.300
N800G1X94.425Y5.842Z-0.300
N810G1X94.034Y5.412Z-0.300
N820G1X93.604Y5.021Z-0.300
N830G1X93.137Y4.672Z-0.300
N840G1X92.637Y4.368Z-0.300
N850G1X92.106Y4.112Z-0.300
N860G1X91.548Y3.908Z-0.300
N870G1X90.966Y3.758Z-0.300
N880G1X90.364Y3.666Z-0.300
N890G1X89.772Y3.636Z-0.300
N900G1X9.718Y3.636Z-0.300
N910G1X9.126Y3.666Z-0.300
N920G1X8.524Y3.758Z-0.300
N930G1X7.942Y3.908Z-0.300
N940G1X7.384Y4.112Z-0.300
N950G1X6.853Y4.368Z-0.300
N960G1X6.353Y4.672Z-0.300
N970G1X5.886Y5.021Z-0.300
N980G1X5.456Y5.412Z-0.300
N990G1X5.456Y5.412Z-0.600F120.0
N1000G1X5.065Y5.842Z-0.600F120.0
N1010G1X4.716Y6.309Z-0.600
N1020G1X4.412Y6.809Z-0.600
N1030G1X4.156Y7.340Z-0.600
N1040G1X3.952Y7.898Z-0.600
N1050G1X3.802Y8.480Z-0.600
N1060G1X3.710Y9.082Z-0.600
N1070G1X3.680Y9.674Z-0.600
N1080G1X3.680Y59.728Z-0.600
N1090G1X3.710Y60.320Z-0.600
N1100G1X3.802Y60.922Z-0.600
N1110G1X3.952Y61.504Z-0.600
N1120G1X4.156Y62.062Z-0.600
N1130G1X4.412Y62.593Z-0.600
N1140G1X4.716Y63.093Z-0.600
N1150G1X5.065Y63.560Z-0.600
N1160G1X5.456Y63.990Z-0.600
N1170G1X5.886Y64.381Z-0.600

N1180G1X6.353Y64.730Z-0.600
N1190G1X6.853Y65.034Z-0.600
N1200G1X7.384Y65.290Z-0.600
N1210G1X7.942Y65.494Z-0.600
N1220G1X8.524Y65.644Z-0.600
N1230G1X9.126Y65.736Z-0.600
N1240G1X9.718Y65.766Z-0.600
N1250G1X89.772Y65.766Z-0.600
N1260G1X90.364Y65.736Z-0.600
N1270G1X90.966Y65.644Z-0.600
N1280G1X91.548Y65.494Z-0.600
N1290G1X92.106Y65.290Z-0.600
N1300G1X92.637Y65.034Z-0.600
N1310G1X93.137Y64.730Z-0.600
N1320G1X93.604Y64.381Z-0.600
N1330G1X94.034Y63.990Z-0.600
N1340G1X94.425Y63.560Z-0.600
N1350G1X94.774Y63.093Z-0.600
N1360G1X95.078Y62.593Z-0.600
N1370G1X95.334Y62.062Z-0.600
N1380G1X95.538Y61.504Z-0.600
N1390G1X95.688Y60.922Z-0.600
N1400G1X95.780Y60.320Z-0.600
N1410G1X95.810Y59.728Z-0.600
N1420G1X95.810Y9.674Z-0.600
N1430G1X95.780Y9.082Z-0.600
N1440G1X95.688Y8.480Z-0.600
N1450G1X95.538Y7.898Z-0.600
N1460G1X95.334Y7.340Z-0.600
N1470G1X95.078Y6.809Z-0.600
N1480G1X94.774Y6.309Z-0.600
N1490G1X94.425Y5.842Z-0.600
N1500G1X94.034Y5.412Z-0.600
N1510G1X93.604Y5.021Z-0.600
N1520G1X93.137Y4.672Z-0.600
N1530G1X92.637Y4.368Z-0.600
N1540G1X92.106Y4.112Z-0.600
N1550G1X91.548Y3.908Z-0.600
N1560G1X90.966Y3.758Z-0.600

N1570G1X90.364Y3.666Z-0.600
N1580G1X89.772Y3.636Z-0.600
N1590G1X9.718Y3.636Z-0.600
N1600G1X9.126Y3.666Z-0.600
N1610G1X8.524Y3.758Z-0.600
N1620G1X7.942Y3.908Z-0.600
N1630G1X7.384Y4.112Z-0.600
N1640G1X6.853Y4.368Z-0.600
N1650G1X6.353Y4.672Z-0.600
N1660G1X5.886Y5.021Z-0.600
N1670G1X5.456Y5.412Z-0.600
N1680G00X5.456Y5.412Z6.000
N1690S16000M03

(Profile 5)

()
N3220G00X21.647Y22.717Z6.000
N3230G1X21.647Y22.717Z-0.300F120.0
N3240G1X26.546Y49.258Z-0.300F120.0
N3250G1X33.078Y49.258Z-0.300
N3260G1X37.976Y22.717Z-0.300
N3270G1X30.628Y22.717Z-0.300
N3280G1X29.433Y30.534Z-0.300
N3290G1X25.550Y30.534Z-0.300
N3300G1X24.097Y22.717Z-0.300
N3310G1X21.647Y22.717Z-0.300
N3320G1X21.647Y22.717Z-0.600F120.0
N3330G1X26.546Y49.258Z-0.600F120.0
N3340G1X33.078Y49.258Z-0.600
N3350G1X37.976Y22.717Z-0.600
N3360G1X30.628Y22.717Z-0.600
N3370G1X29.433Y30.534Z-0.600
N3380G1X25.550Y30.534Z-0.600
N3390G1X24.097Y22.717Z-0.600
N3400G1X21.647Y22.717Z-0.600
N3410G00X21.647Y22.717Z6.000
N3420S16000M03

(Profile 6)

()

N3450G00X26.909Y33.661Z6.000
 N3460G1X26.909Y33.661Z-0.300F120.0
 N3470G1X28.442Y42.013Z-0.300F120.0
 N3480G1X29.737Y33.661Z-0.300
 N3490G1X26.909Y33.661Z-0.300
 N3500G1X26.909Y33.661Z-0.600F120.0
 N3510G1X28.442Y42.013Z-0.600F120.0
 N3520G1X29.737Y33.661Z-0.600
 N3530G1X26.909Y33.661Z-0.600
 N3540G00X26.909Y33.661Z6.000
 N3550S16000M03
 (Profile 7)
 ()
 N3580G00X38.919Y22.755Z6.000
 N3590G1X38.919Y22.755Z-0.300F120.0
 N3600G1X38.919Y49.296Z-0.300F120.0
 N3610G1X46.247Y49.296Z-0.300
 N3620G1X49.115Y30.725Z-0.300
 N3630G1X51.962Y49.296Z-0.300
 N3640G1X54.412Y49.296Z-0.300
 N3650G1X58.494Y49.296Z-0.300
 N3660G1X58.494Y22.755Z-0.300
 N3670G1X54.412Y22.755Z-0.300
 N3680G1X51.962Y22.755Z-0.300
 N3690G1X51.962Y31.602Z-0.300
 N3700G1X51.962Y33.356Z-0.300
 N3710G1X50.329Y22.755Z-0.300
 N3720G1X47.880Y22.755Z-0.300
 N3730G1X46.247Y33.356Z-0.300
 N3740G1X46.247Y22.755Z-0.300
 N3750G1X38.919Y22.755Z-0.300
 N3760G1X38.919Y22.755Z-0.600F120.0
 N3770G1X38.919Y49.296Z-0.600F120.0
 N3780G1X46.247Y49.296Z-0.600
 N3790G1X49.115Y30.725Z-0.600
 N3800G1X51.962Y49.296Z-0.600
 N3810G1X54.412Y49.296Z-0.600
 N3820G1X58.494Y49.296Z-0.600
 N3830G1X58.494Y22.755Z-0.600

N3840G1X54.412Y22.755Z-0.600
 N3850G1X51.962Y22.755Z-0.600
 N3860G1X51.962Y31.602Z-0.600
 N3870G1X51.962Y33.356Z-0.600
 N3880G1X50.329Y22.755Z-0.600
 N3890G1X47.880Y22.755Z-0.600
 N3900G1X46.247Y33.356Z-0.600
 N3910G1X46.247Y22.755Z-0.600
 N3920G1X38.919Y22.755Z-0.600
 N3930G00X38.919Y22.755Z6.000
 N3940S16000M03
 (Profile 8)
 ()
 N3970G00X60.287Y22.831Z6.000
 N3980G1X60.287Y22.831Z-0.300F120.0
 N3990G1X60.287Y44.682Z-0.300F120.0
 N4000G1X60.287Y47.809Z-0.300
 N4010G1X60.287Y49.373Z-0.300
 N4020G1X66.798Y49.373Z-0.300
 N4030G1X71.697Y49.373Z-0.300
 N4040G1X71.697Y44.682Z-0.300
 N4050G1X66.798Y44.682Z-0.300
 N4060G1X66.798Y38.466Z-0.300
 N4070G1X70.881Y38.466Z-0.300
 N4080G1X70.881Y35.339Z-0.300
 N4090G1X66.798Y35.339Z-0.300
 N4100G1X66.798Y27.522Z-0.300
 N4110G1X71.697Y27.522Z-0.300
 N4120G1X71.697Y22.831Z-0.300
 N4130G1X66.798Y22.831Z-0.300
 N4140G1X60.287Y22.831Z-0.300
 N4150G1X60.287Y22.831Z-0.600F120.0
 N4160G1X60.287Y44.682Z-0.600F120.0
 N4170G1X60.287Y47.809Z-0.600
 N4180G1X60.287Y49.373Z-0.600
 N4190G1X66.798Y49.373Z-0.600
 N4200G1X71.697Y49.373Z-0.600
 N4210G1X71.697Y44.682Z-0.600
 N4220G1X66.798Y44.682Z-0.600

N4230G1X66.798Y38.466Z-0.600
 N4240G1X70.881Y38.466Z-0.600
 N4250G1X70.881Y35.339Z-0.600
 N4260G1X66.798Y35.339Z-0.600
 N4270G1X66.798Y27.522Z-0.600
 N4280G1X71.697Y27.522Z-0.600
 N4290G1X71.697Y22.831Z-0.600
 N4300G1X66.798Y22.831Z-0.600
 N4310G1X60.287Y22.831Z-0.600
 N4320G00X60.287Y22.831Z6.000
 N4330S16000M03
 (Profile 9)
 ()
 N4360G00X72.879Y22.755Z6.000
 N4370G1X72.879Y22.755Z-0.300F120.0
 N4380G1X72.879Y38.390Z-0.300F120.0
 N4390G1X72.879Y47.771Z-0.300
 N4400G1X72.879Y49.335Z-0.300
 N4410G1X79.410Y49.335Z-0.300
 N4420G1X79.410Y38.390Z-0.300
 N4430G1X79.410Y27.446Z-0.300
 N4440G1X84.289Y27.446Z-0.300
 N4450G1X84.289Y22.755Z-0.300
 N4460G1X76.145Y22.755Z-0.300
 N4470G1X72.879Y22.755Z-0.300
 N4480G1X72.879Y22.755Z-0.600F120.0
 N4490G1X72.879Y38.390Z-0.600F120.0
 N4500G1X72.879Y47.771Z-0.600
 N4510G1X72.879Y49.335Z-0.600
 N4520G1X79.410Y49.335Z-0.600
 N4530G1X79.410Y38.390Z-0.600
 N4540G1X79.410Y27.446Z-0.600
 N4550G1X84.289Y27.446Z-0.600
 N4560G1X84.289Y22.755Z-0.600
 N4570G1X76.145Y22.755Z-0.600
 N4580G1X72.879Y22.755Z-0.600
 N4590G00X72.879Y22.755Z6.000
 N4600S16000M03
 (Profile 10)

()
N4630G00X85.404Y22.755Z6.000
N4640G1X85.404Y22.755Z-0.300F120.0
N4650G1X85.404Y44.606Z-0.300F120.0
N4660G1X85.404Y47.733Z-0.300
N4670G1X85.404Y49.296Z-0.300
N4680G1X91.916Y49.296Z-0.300
N4690G1X91.916Y44.606Z-0.300
N4700G1X91.916Y22.755Z-0.300
N4710G1X85.404Y22.755Z-0.300
N4720G1X85.404Y22.755Z-0.600F120.0
N4730G1X85.404Y44.606Z-0.600F120.0
N4740G1X85.404Y47.733Z-0.600
N4750G1X85.404Y49.296Z-0.600
N4760G1X91.916Y49.296Z-0.600
N4770G1X91.916Y44.606Z-0.600
N4780G1X91.916Y22.755Z-0.600
N4790G1X85.404Y22.755Z-0.600
N4800G00X85.404Y22.755Z6.000
N4810S16000M03

(Profile 1)

()
N4840G00X1.350Y0.728Z6.000
N4850G1X1.350Y0.728Z-0.429F120.0
N4860G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N4870G1X0.100Y67.732Z-0.429
N4880G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N4890G1X99.061Y68.982Z-0.429
N4900G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N4910G1X100.311Y1.978Z-0.429
N4920G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N4930G1X1.350Y0.728Z-0.429
N4940G1X1.350Y0.728Z-0.857F120.0
N4950G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N4960G1X0.100Y67.732Z-0.857
N4970G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N4980G1X99.061Y68.982Z-0.857
N4990G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5000G1X100.311Y1.978Z-0.857

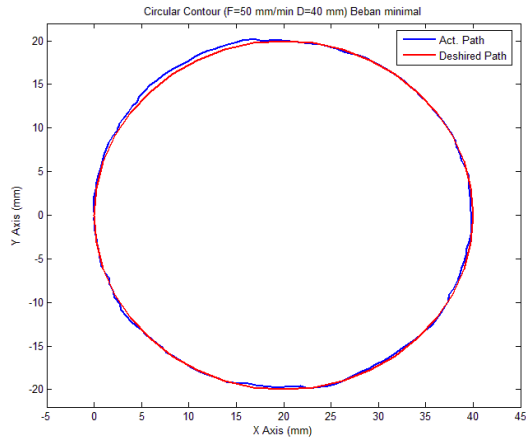
N5010G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5020G1X1.350Y0.728Z-0.857
N5030G1X1.350Y0.728Z-1.286F120.0
N5040G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N5050G1X0.100Y67.732Z-1.286
N5060G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N5070G1X99.061Y68.982Z-1.286
N5080G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5090G1X100.311Y1.978Z-1.286
N5100G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5110G1X1.350Y0.728Z-1.286
N5120G1X1.350Y0.728Z-1.714F120.0
N5130G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N5140G1X0.100Y67.732Z-1.714
N5150G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N5160G1X99.061Y68.982Z-1.714
N5170G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5180G1X100.311Y1.978Z-1.714
N5190G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5200G1X1.350Y0.728Z-1.714
N5210G1X1.350Y0.728Z-2.143F120.0
N5220G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N5230G1X0.100Y67.732Z-2.143
N5240G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N5250G1X99.061Y68.982Z-2.143
N5260G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5270G1X100.311Y1.978Z-2.143
N5280G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5290G1X1.350Y0.728Z-2.143
N5300G1X1.350Y0.728Z-2.571F120.0
N5310G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N5320G1X0.100Y67.732Z-2.571
N5330G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N5340G1X99.061Y68.982Z-2.571
N5350G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5360G1X100.311Y1.978Z-2.571
N5370G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5380G1X1.350Y0.728Z-2.571
N5390G1X1.350Y0.728Z-3.000F120.0

N5400G2X0.100Y1.978I0.000J1.250F120.0
N5410G1X0.100Y67.732Z-3.000
N5420G2X1.350Y68.982I1.250J0.000
N5430G1X99.061Y68.982Z-3.000
N5440G2X100.311Y67.732I0.000J-1.250
N5450G1X100.311Y1.978Z-3.000
N5460G2X99.061Y0.728I-1.250J0.000
N5470G1X1.350Y0.728Z-3.000
N5480G00X1.350Y0.728Z6.000
N5490G00Z20.000
N5500G00X0.000Y0.000
N5510M09
N5520M30
%

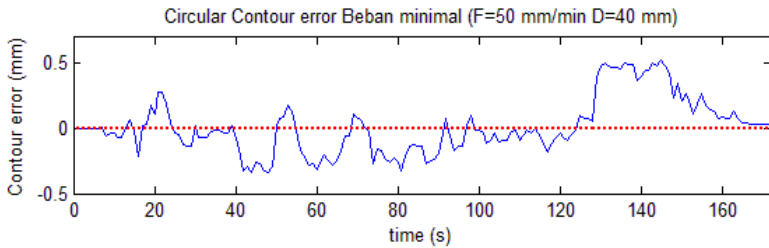
LAMPIRAN B

B.1 Hasil Pengujian beban minimal

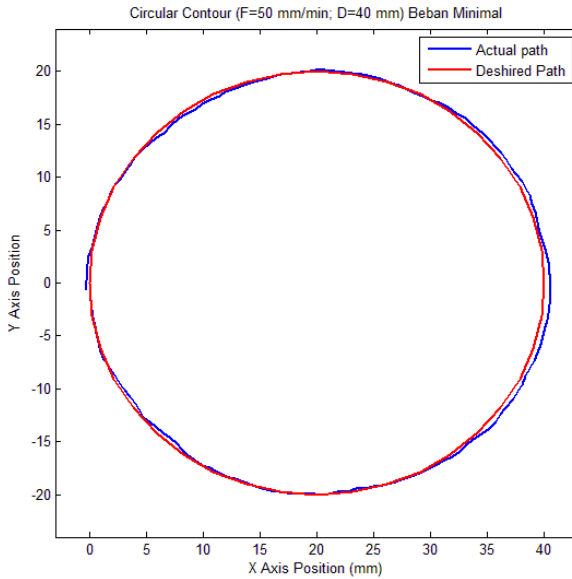
B.1.1 Feedrate 50 mm/min



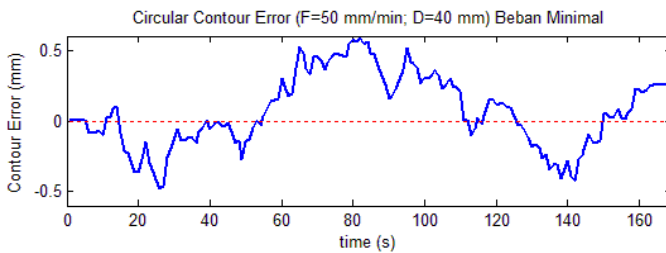
Gambar B.1 Hasil Kontur lingkaran pengujian beban minimal F=50 mm/min ke-2



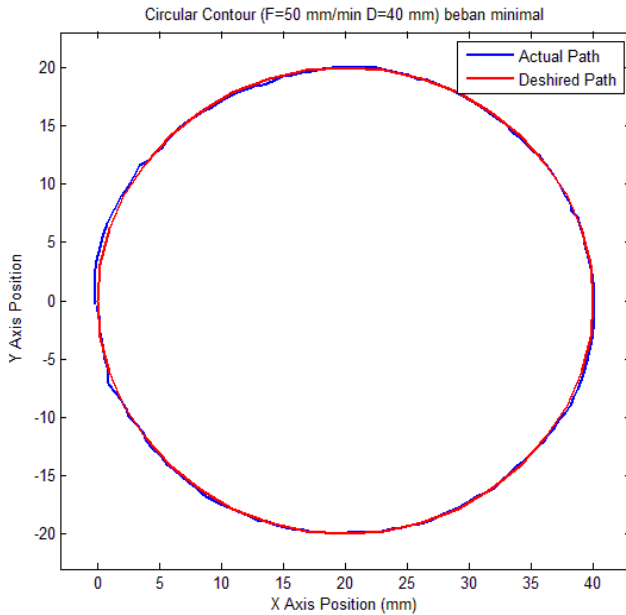
Gambar B.2 Hasil circular contour error pada pengujian beban minimal ke-1



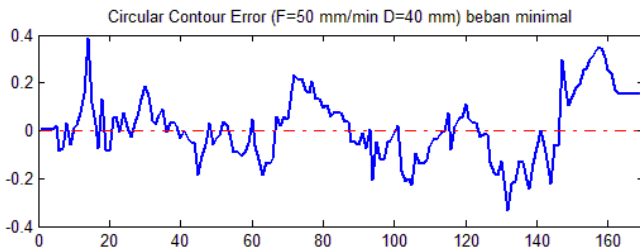
Gambar B.3 Hasil Kontur lingkaran pengujian beban F=50 mm/min minimal ke-2



Gambar B.4 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-2 F=50 mm/min

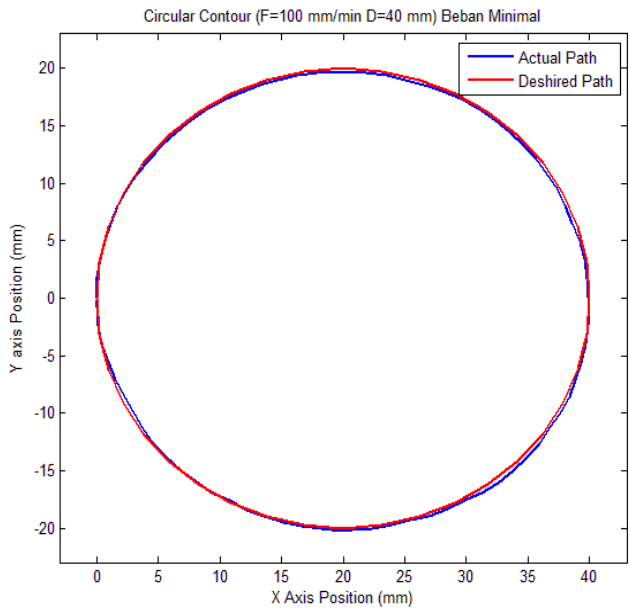


Gambar B.3 Hasil Kontur lingkaran pengujian beban minimal ke-3 $F=50$ mm/min

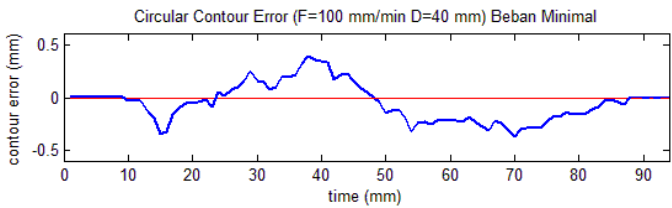


Gambar B.4 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke 3 $F=50$ mm/min

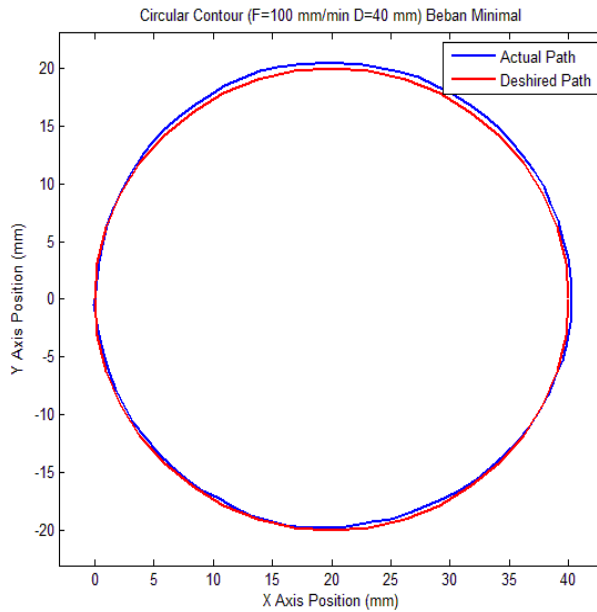
B.1.2 Feedrate 100 mm/min



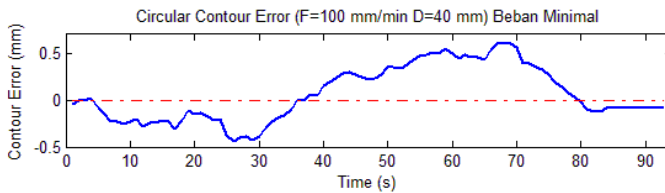
Gambar B.5 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-1 F=100 mm/min



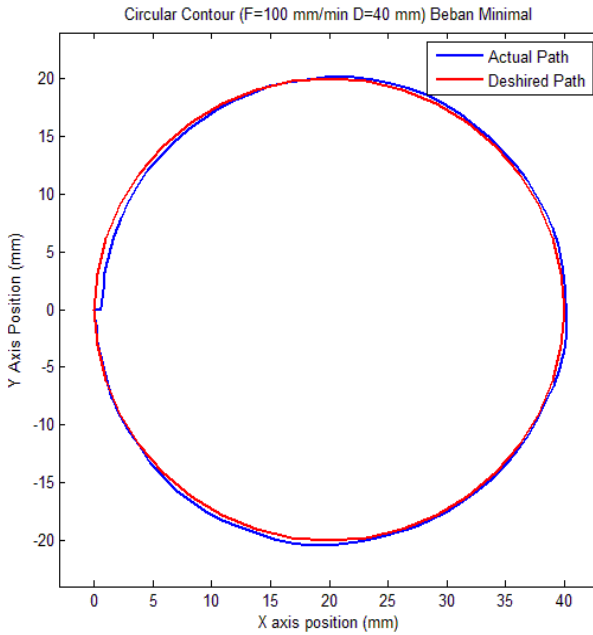
Gambar B.6 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-1 F=100 mm/min



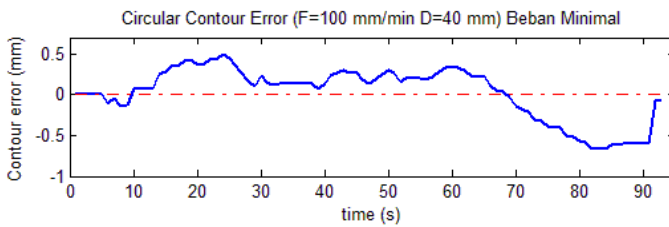
Gambar B.7 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-2 F=100 mm/min



Gambar B.8 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-2 F=100 mm/min

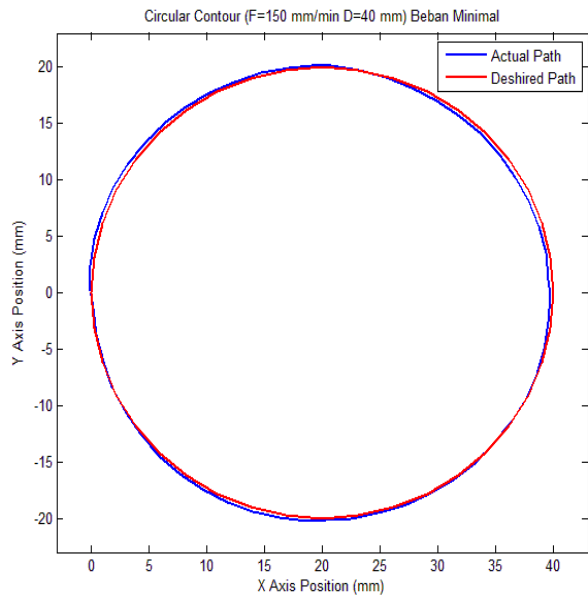


Gambar B.9 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-3 F=100 mm/min

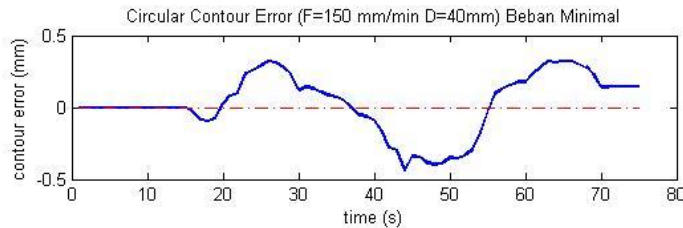


Gambar B.10 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke 3 F=100 mm/min

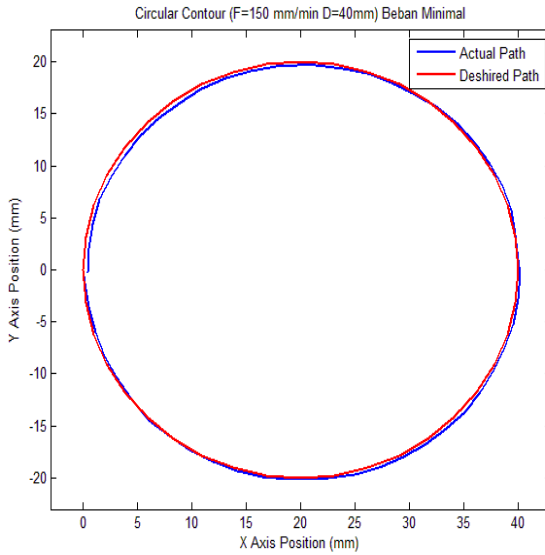
B.1.3 Feedrate 150 mm/min



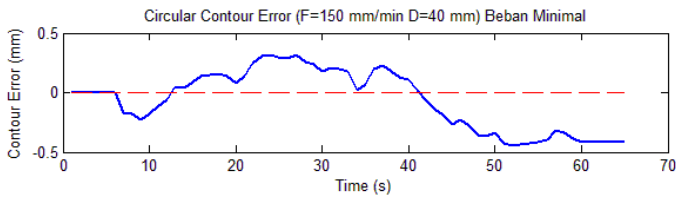
Gambar B.11 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-1 F=150 mm/min



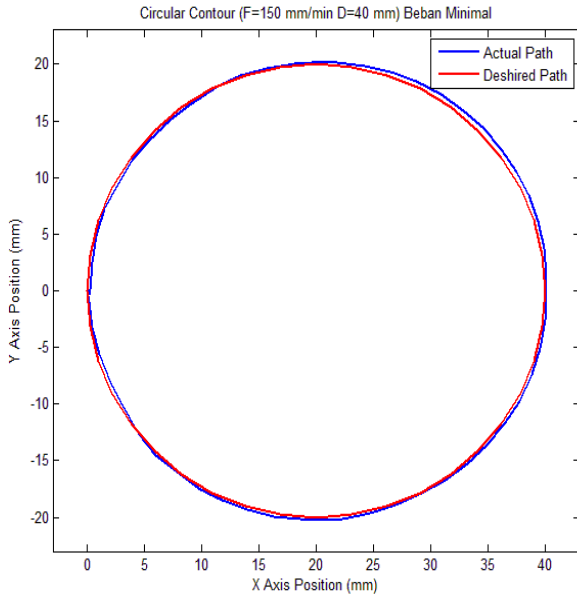
Gambar B.10 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-1 F=150 mm/min



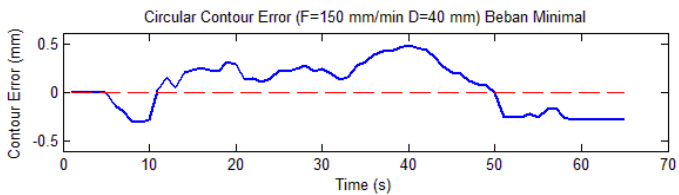
Gambar B.11 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-2 $F=150$ mm/min



Gambar B.12 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-2 $F=150$ mm/min



Gambar B.11 Hasil *circular contour* pada pengujian beban minimal ke-3 F=150 mm/min



Gambar B.12 Hasil *circular contour error* pada pengujian beban minimal ke-3 F=150 mm/min

B.2 Hasil Pengujian Beban Nominal Pemotongan Benda Kerja *Softboard* pada kecepatan pemakanan 50, 100 dan 150 mm/min



Gambar B.2.1 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 50 mm/min



Gambar B.2.2 Hasil Pemotongan ke-3 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 50 mm/min



Gambar B.2.3 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 100 mm/min



Gambar B.2.4 Hasil Pemotongan ke-3 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 100 mm/min



Gambar B.2.6 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 150 mm/min



Gambar B.2.7 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja *Softboard* dengan *Feedrate* 150 mm/min

B.3 Hasil Pengujian Beban Nominal Pemotongan Benda Kerja akrilik pada kecepatan pemakanan 50, 100 dan 150 mm/min



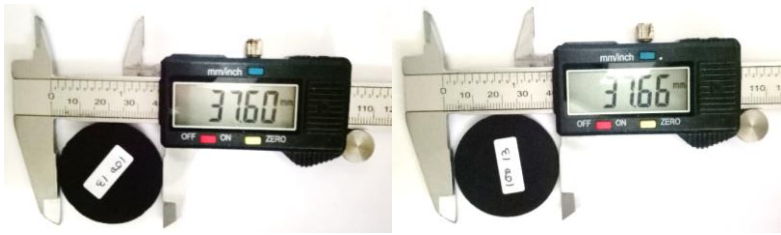
Gambar B.3.1 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 50 mm/min



Gambar B.3.2 Hasil Pemotongan ke-3 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 50 mm/min



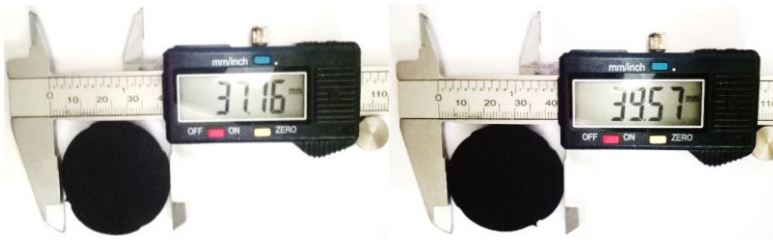
Gambar B.3.3 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 100 mm/min



Gambar B.3.4 Hasil Pemotongan ke-3 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 100 mm/min



Gambar B.3.6 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 150 mm/min



Gambar B.3.7 Hasil Pemotongan ke-2 Benda Kerja Akrilik dengan *Feedrate* 150 mm/min

B.4 Hasil Pengujian Beban Nominal Pemotongan Benda Kerja mengikuti kontur kombinasi linier dan circular



Gambar B.4.1 Hasil Pemotongan Benda Kerja *Softboard* Mengikuti kontur kombinasi circular dan linier ke-1



Gambar B.4.2 Hasil Pemotongan Benda Kerja *Softboard* Mengikuti kontur kombinasi circular dan linier ke-2



Gambar B.4.3 Hasil Pemotongan Benda Kerja akrilik Mengikuti kontur kombinasi circular dan linier ke-1



Gambar B.4.4 Hasil Pemotongan Benda Kerja Akrilik Mengikuti kontur kombinasi circular dan linier ke-2



Gambar B.4.5 Hasil Pemotongan Benda Kerja Multiplek Mengikuti kontur kombinasi circular dan linier

RIWAYAT HIDUP



Wahyu Arifianto, lahir di Jombang pada tanggal 16 April 1995. Putra kedua dari pasangan Bapak Suhariyono dan Ibu Wahyu Sri W. Setelah menempuh pendidikan formal di SDN 1 Gedeg, SMPN 1 Gedeg dan SMAN 1 Sooko, penulis melanjutkan studi S1 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan mengambil Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Pengaturan. Pada tanggal 4 Juli 2018, penulis mengikuti ujian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

[Halaman ini sengaja dikosongkan]